



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/04.20.18.43-TDI

PARAMETRIZAÇÃO DA EMISSÃO DE METANO NA INTERFACE ÁGUA-ATMOSFERA EM HIDRELÉTRICAS

Marcelo Gomes da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Luciano Marani, e Plínio Carlos Alvalá, aprovada em 25 de fevereiro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JC25PH>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/04.20.18.43-TDI

PARAMETRIZAÇÃO DA EMISSÃO DE METANO NA INTERFACE ÁGUA-ATMOSFERA EM HIDRELÉTRICAS

Marcelo Gomes da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Luciano Marani, e Plínio Carlos Alvalá, aprovada em 25 de fevereiro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JC25PH>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Marcelo Gomes da.
Si38p Parametrização da emissão de metano na interface água-atmosfera em hidrelétricas / Marcelo Gomes da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2015.
xxx + 113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/04.20.18.43-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
Orientadores : Drs. Luciano Marani, e Plínio Carlos Alvalá.

1. Metano. 2. Hidrelétricas. 3. Efeito estufa. I.Título.

CDU 550.46:553.981.4:621.311.21



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Polinaya Muralikrishna



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Luciano Marani



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Plínio Carlos Alvalá



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Ana Paula Contador Packer



Convidado(a) / EMBRAPA / Jaguariúna - SP

Dr. Donato Seiji Abe



Convidado(a) / IIE / São Carlos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Marcelo Gomes da Silva**

São José dos Campos, 25 de Fevereiro de 2015

“O verdadeiro faixa preta é aquele faixa branca que jamais se deu por vencido”

A meus pais
Maria Lúcia Gomes da Silva
Manuel Arcanjo da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Maria Lúcia Gomes da Silva e Manuel Arcanjo da Silva, minha irmã Mônica Gomes da Silva, meu sobrinho Arthur Gomes e meu avô Francisco Arthur Gomes (Vô Chico). Palavras não expressam a importância de vocês para mim.

Aos meus estimados orientadores Plínio Carlos Alvalá e Luciano Marani, por toda dedicação e conselhos durante o mestrado e doutorado sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

À Christianne Godoy por todo o companheirismo e compreensão no decorrer dessa longa jornada.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental: Domingos Sardella, Willian José Ferreira, Lia Braz, José Roberto Chagas e Roberta Lee Alcaide pela convivência e ajuda inestimável.

À Cleonice Orlandelli por ter mostrado o caminho em momentos de dúvida.

Aos amigos Ericka Voss Chagas Mariano, Glauber Mariano, Mári Firpo, Wendell Farias, Virginia Piccinini pelo companheirismo e pela amizade.

Ao Dr. Oli Dors pelo aprendizado sobre a realidade do ensino universitário.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) que forneceu suporte logístico para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de Doutorado concedida.

RESUMO

São apresentados os resultados da parametrização do fluxo de metano na interface água-atmosfera em reservatórios de usinas hidrelétricas. Entre 2011 e 2013, foram realizadas quarenta e seis campanhas de coleta de dados em onze reservatórios (Batalha, Belo Monte, Santo Antônio, Balbina, Funil, Itaipu, Segredo, Serra da Mesa, Três Marias, Tucuruí e Xingó), localizados em todas as regiões do Brasil. O fluxo de metano foi determinado através da técnica de câmara estática e o metano dissolvido na água pela da técnica de “*headspace*”. A média geral de fluxos difusivos para todos os reservatórios foi de $12,4 \pm 16,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($n = 989$) e para ebulitivos foi de $888,6 \pm 1872,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($n = 88$). Variáveis que poderiam ter influência nos fluxos de metano, como profundidade, temperatura do ar e da água, pH, potencial de oxirredução, oxigênio dissolvido e total de sólidos dissolvidos, foram medidos nos pontos de coleta, mas não foi observada predominância de correlação de alguma delas com os fluxos. Em apenas cinco reservatórios (Belo Monte, Balbina, Itaipu, Segredo e Xingó) foram coletadas todas as informações necessárias para o cálculo da constante de troca gasosa k (fluxo, temperatura da água, concentração do metano dissolvido na água e no ar). Nestes cinco reservatórios, foi possível obter uma relação entre k e a velocidade do vento quando se considerou velocidades inferiores a 4 m s^{-1} . A análise individual mostrou que esta correlação não pode ser extrapolada para todo o reservatório nos casos de Balbina, Segredo e Xingó. Para Belo Monte e Itaipu determinaram-se os índices que permitiram a parametrização da equação de k em função da velocidade do vento, tornando possível estimar o fluxo de metano a partir de medidas indiretas. A comparação entre os fluxos estimados e medidos para Belo Monte e Itaipu mostrou alta correlação (Belo Monte: $r = 0,82$; Itaipu : $r = 0,99$). Uma comparação das médias gerais mostrou que, em ambos os casos, o fluxo estimado foi maior que o medido.

PARAMETERIZATION OF METHANE EMISSION IN AIR-WATER INTERFACE IN HYDROELECTRIC RESERVOIRS

ABSTRACT

This study presents the results of the parameterization of methane fluxes in the water-atmosphere interface in hydroelectric reservoirs. Between 2011 and 2013, there were forty-six data collection campaigns in eleven reservoirs (Batalha, Belo Monte, Santo Antônio, Balbina, Funil, Itaipu, Segredo, Serra da Mesa, Três Marias, Tucuruí e Xingó), located in all regions of Brazil. The methane flux was determined by static chamber technique and dissolved methane in the water by the technique of “*headspace*”. The overall average of diffusive fluxes to all the reservoirs was $12,4 \pm 16,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($n = 989$), and to bubble fluxes was $888,6 \pm 1872,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($n = 88$). Variables that could have an influence on the methane fluxes, such as depth, air and water temperature, pH, redox potential, dissolved oxygen, and total dissolved solids, were also measured at collection points. It was not observed predominant correlation between any of these environmental parameters and methane fluxes. Only five reservoirs (Belo Monte, Balbina, Itaipu, Segredo e Xingó) had all information needed to calculating the constant gas exchange k (flux, water temperature, dissolved methane in water and air). In these five reservoirs, it was possible to obtain a relationship between the constant gas exchange and wind speed lower than 4 m s^{-1} . Individual analysis showed that this correlation cannot be extrapolated for the entire reservoirs at Balbina, Segredo e Xingó. For Belo Monte and Itaipu was determinate the indexes that allowed the parameterization of the k equation in function of wind speed. This equation allowed estimates the methane fluxes from indirect parameters. The comparison between the estimated and measured fluxes resulted in high correlation (Belo Monte: $r = 0,82$; Itaipu : $r = 0,99$). A comparison of the overall average showed that in both cases the estimated fluxes was higher than measured.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1: Variação da temperatura e razão de mistura de metano atmosférico nos últimos 450.000 anos.	5
Figura 3.2: Variação da razão de mistura de metano atmosférico a partir do século XVII obtidos a partir de modelos (DE08-1 Ice, DE08-2 Ice, DSS Ice) e medições (Ar Polo Sul).....	6
Figura 3.3: Razão de mistura atmosférica global média (linha vermelha) e a média global sazonal do metano (linha azul).	7
Figura 3.4: Esquema da produção, transporte e consumo de metano em lagos e áreas alagáveis.	12
Figura 3.5: Conceito de troca gasosa em sistema de duas camadas (ar-água). A linha azul representa a emissão do gás do meio mais saturado (água) para meio menos saturado (ar). A linha vermelha representa a absorção do meio mais saturado (ar) para o menos saturado (água).	17
Figura 3.6: Fluxo em função da concentração de metano na interface ar-água para velocidades do vento de 0 a 3,5 m s ⁻¹	20
Figura 3.7: Altura da ondulação na superfície da água (acima) e coeficiente de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento (abaixo).	21
Figura 4.1: Mapa com a distribuição dos reservatórios de centrais hidrelétricas e os biomas em que estão inseridos.	23
Figura 4.2: Imagem de satélite da área do futuro reservatório da UHE Batalha e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	26
Figura 4.3: Imagem de satélite da área do futuro reservatório da UHE Belo Monte e localização dos pontos de amostragem (em vermelho).	27
Figura 4.4: Imagem de satélite da área do futuro reservatório da UHE Santo Antônio e localização dos pontos de amostragem (em vermelho).	28
Figura 4.5: Fotos ilustrando casos de árvores mortas por alagamento da área, conhecidos como “paliteiros”	29
Figura 4.6: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Balbina e localização dos pontos de amostragem (em vermelho).	30

Figura 4.7: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Funil e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	31
Figura 4.8: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Itaipu e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	32
Figura 4.9: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Segredo e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	33
Figura 4.10: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Serra da Mesa e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	34
Figura 4.11: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Três Marias e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	35
Figura 4.12: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Tucuruí e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	36
Figura 4.13: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Xingó e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).	37
Figura 4.14: Foto de câmara estática na água (esquerda). Esquema de câmara estática acoplada a seringa para coleta de ar do interior (direita).	38
Figura 4.15: Técnica de headspace. (a) coleta da amostra, (b, c) preparação da amostra para aplicação da técnica, (d) repouso para que o equilíbrio seja atingido.....	40
Figura 4.16: Variação temporal da razão de mistura de metano medido no interior da câmara para fluxos difusivos (a) e fluxos ebulitivos (b).	42
Figura 5.1: Número de fluxos difusivos (azul) e ebulitivos (vermelho) nos reservatórios de usinas hidrelétricas.	50
Figura 5.2: Box-plot comparativo do fluxo difusivo (esquerda) e fluxo ebulitivo (direita) nos reservatórios.....	51
Figura 5.3: Média de fluxo difusivo em função da média de metano dissolvido na água próximo à superfície de todos os reservatórios.	54
Figura 5.4.A: Fluxo difusivo em função da concentração de metano dissolvido obtido por uma amostra de água (pontos pretos) e pela média de cinco amostras (pontos vermelhos) para todos os reservatórios.....	56

Figura 5.4.B: Fluxo difusivo em função da concentração de metano dissolvido obtido por uma amostra de água (pontos pretos) e pela média de cinco amostras (pontos vermelhos) para todos os reservatórios (Continuação).	57
Figura 5.5: Média de fluxo difusivo em função da média de metano dissolvido na água obtido por quintuplicatas.....	58
Figura 5.6: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada para 10 metros (U_{10}) em todos os reservatórios.	62
Figura 5.7: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) menor que 4 ms^{-1} (esquerda) e para U_{10} maior ou igual a 4 ms^{-1} (direita) utilizando todos os pontos dos reservatórios.....	63
Figura 5.8: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) em Belo Monte.	64
Figura 5.9: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) em Balbina.	64
Figura 5.10: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) menor que 4 m s^{-1} (esquerda) e maior ou igual a 4 m s^{-1} (direita) em Itaipu (acima), Segredo (meio) e Xingó (abaixo).	65
Figura 5.11: A linha vermelha representa a relação entre a constante de troca gasosa e velocidade do vento corrigida nos pontos selecionados para gerar a equação da curva do reservatório de Belo Monte. As linhas verdes representam o nível de confiança de 95%.	67
Figura 5.12: A linha vermelha representa a relação entre a constante de troca gasosa e velocidade do vento corrigida nos pontos selecionados para gerar a equação da curva do reservatório de Itaipu. As linhas verdes representam o nível de confiança de 95%.	68
Figura 5.13: A linha vermelha representa a relação entre o fluxo estimado de metano e o fluxo medido através de câmara estática nos reservatórios de Belo Monte (esquerda) e Itaipu (direita). As linhas verdes representam o nível de confiança de 95%.	69
Apêndice B.1: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Batalha.....	97
Apêndice B.2: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Belo Monte.....	98

- Apêndice B.3: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Santo Antônio. 99
- Apêndice B.4: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Balbina..... 100
- Apêndice B.5: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Funil. 101
- Apêndice B.6: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Itaipu. 102
- Apêndice B.7: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Segredo. 103
- Apêndice B.8: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Serra da Mesa. 104
- Apêndice B.9: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Três Marias.... 105
- Apêndice B.10: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Tucuruí..... 106
- Apêndice B.11: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Xingó..... 107
- Apêndice B.12: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que

compõem a componente principal (abaixo, direita) para todas as hidrelétricas..... 108

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1 - Faixa de variação de fontes e sumidouros de metano atmosférico.....	9
Tabela 4.1 – Características gerais das hidrelétricas.....	24
Tabela 4.2 – Parâmetros da água, faixa de medida, resolução e precisão.....	47
Tabela 5.1 – Média e desvio padrão dos parâmetros ambientais medidos em todas as campanhas para cada hidrelétrica.	52
Tabela 5.2 – Coeficiente de determinação (R^2), probabilidade de significância (p) e número de casos (n) entre fluxo difusivo e metano dissolvido obtido para uma e cinco amostras de água. Em destaque, os valores que apresentaram significância ($p \leq 0,05$).	55
Tabela 5.3 – Média da constante de troca gasosa corrigida (k) e média da velocidade do vento nos reservatórios considerando os pontos em todas as campanhas.....	61
Tabela 5.4 – Valores da constante de troca gasosa (k) estimada através da equação do reservatório em função da velocidade de vento corrigida (U_{10}).	68
Tabela.A.1 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Batalha.....	85
Tabela A.2 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Batalha.	85
Tabela A.3 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Belo Monte.....	86
Tabela A.4 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Belo Monte.	86
Tabela A.5 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Santo Antônio.	87
Tabela A.6 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Santo Antônio.....	87
Tabela A.7 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Balbina.....	88
Tabela A.8 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Balbina.	88

Tabela A.9 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Funil.	89
Tabela A.10 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Funil.	89
Tabela A.11 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Itaipu.	90
Tabela A.12 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Itaipu.	90
Tabela A.13 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Segredo.	91
Tabela A.14 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Segredo.....	91
Tabela A.15 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Serra da Mesa.	92
Tabela A.16 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Serra da Mesa.....	92
Tabela A.17 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Três Marias.	93
Tabela A.18 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Três Marias.	93
Tabela A.19 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Tucuruí.....	94
Tabela A.20 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Tucuruí.	94
Tabela A.21 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Xingó.....	95
Tabela A.22 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Xingó.	95
Tabela C.1 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Batalha baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA)...	109
Tabela C.2 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Belo Monte baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA)...	109
Tabela C.3 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Balbina baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA)...	110

Tabela C.4 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Itaipu baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA)...	110
Tabela C.5 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Segredo baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA)...	111
Tabela C.6 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Serra da Mesa baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).	111
Tabela C.7 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Tucuruí baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA)...	112
Tabela C.8 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Xingó baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA)...	112
Tabela C.9 – Média da constante de troca gasosa corrigida (k , em cm h^{-1}) para cada ponto considerando os valores de todas as campanhas. Os códigos que definem cada ponto se referem à nomenclatura adotada para diferenciá-los durante as campanhas de coleta de dados.....	113

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CH ₃ COOH	Ácido acético
H ₂ O	Água
ACP	Análise de Componentes Principais
A	Área
atm	Atmosfera
BAL	Balbina
BAT	Batalha
cm	Centímetro
Cl	Cloro
r	Coefficiente de correlação
R ²	Coefficiente de determinação
k _g	Coefficiente de difusão
D	Coefficiente de difusão molecular
β	Coefficiente de Bunsen
α	Coefficiente de Ostwald
C _w	Concentração de gás dissolvido na água
C _a	Concentração de gás dissolvido no ar
k	Constante de troca gasosa
R	Constante universal dos gases
d	Dia
CO ₂	Dióxido de carbono
z	Espessura da camada limite
FID	Flame Ionization Detector (Detector de ionização de chama)
F	Fluxo
FUN	Funil
GEE	Gases do efeito estufa
GWP	Global Warming Potential (Potencial de aquecimento global)
°C	Graus Celsius
H ₂	Hidrogênio

h	Hora
S^{2-}	Íon de enxofre
Fe^{2+}, Fe^{3+}	Íons de ferro
Mn^{2+}, Mn^{4+}	Íons de Manganês
ITA	Itaipu
K	Kelvin
l	Litro
m_{CH_4}	Massa do metano
M_{CH_4}	Massa molar do metano
MW	Megawatt
CH_4	Metano
m	Metro
μg	Micrograma
μm	Micrômetro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mV	Milivolt
NO_3^-	Nitrato
N_2	Nitrogênio
n_{CH_4}	Número de moles do metano
n_t	Número de moles totais
S_c	Número de Schmidt
N_2O	Óxido nitroso
O_2	Oxigênio
OD	Oxigênio dissolvido
ppbv	Partes por bilhão por volume
PVC	Policloreto de polivinila
ORP	Potencial de oxirredução
p	Pressão

p	Probabilidade de significância
Prof	Profundidade
km	Quilômetro
OH	Radical hidroxila
χ	Razão de mistura
STA	Santo Antônio
SEG	Segredo
S	Segundo
SM	Serra da Mesa
W	Soluto
SO_4^{2-}	Sulfato
T	Temperatura
t	Tempo
Tg	Teragramas
TSD	Total de sólidos dissolvidos
TM	Três Marias
TUC	Tucuruí
UHE	Usina hidrelétrica
v	Velocidade
U	Velocidade do vento corrigida
μ	Viscosidade
V	Volume
XIN	Xingó

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Fontes emissoras e sumidouros de metano.....	8
3.2 Lagos e áreas alagáveis.....	10
3.3 Produção e transporte de metano em lagos e áreas alagáveis.....	10
3.4 Influência de parâmetros ambientais no fluxo de metano	12
3.5 Reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHE).....	14
3.6 Fluxo de gases na interface ar-água	15
4 MÉTODOS	23
4.1 Caracterização dos reservatórios.....	25
4.2 Coleta de amostras para determinação do fluxo de metano	37
4.3 Coleta de amostras para determinação de metano dissolvido	39
4.4 Análise laboratorial – Cromatografia gasosa.....	41
4.5 Determinação dos fluxos de metano	42
4.6 Validação dos fluxos e identificação do tipo de transporte	42
4.7 Cálculo para quantificação do fluxo.....	43
4.8 Determinação da razão de mistura de metano dissolvido	45
4.9 Parâmetros ambientais.....	46
4.10 Análise estatística	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 Comparação do fluxo de metano nos reservatórios	49

5.2 Fluxo difusivo x Parâmetros ambientais: Análise estatística	51
5.3 Metano dissolvido.....	53
5.4 Determinação da constante de troca gasosa (k).....	58
5.5 Avaliação da influência da velocidade do vento na constante de troca gasosa (k).....	61
5.6 Estimativa de fluxo em função de metano dissolvido e vento	66
6 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICE A	85
APÊNDICE B	97
APÊNDICE C	109

1 INTRODUÇÃO

O metano (CH_4) é um gás traço de grande importância para a química da atmosfera e para o clima terrestre por ser um dos principais gases do efeito estufa. Sua produção ocorre por diversas fontes (cupins, ruminantes, aterros sanitários, plantações de arroz, queima de combustíveis fósseis, entre outros), mas a maior contribuição individual está associada com lagos e áreas alagáveis. O ambiente anaeróbico formado pela coluna d'água permite que microrganismos existentes no sedimento façam a degradação de matéria orgânica ocasionando a produção de metano.

Diversos fatores físico-químicos da água e da atmosfera podem influenciar a emissão do metano. A quantidade de gás que atinge a interface ar-água depende da relação entre produção e consumo, assim como a forma de transporte ao longo da coluna d'água. A velocidade de troca gasosa na interface ar-água pode ocorrer de forma mais acentuada em virtude de perturbações na superfície causadas por fatores como vento e ondas.

O Brasil tem em seu território diversas áreas alagáveis de grande interesse no estudo de emissão dos gases do efeito estufa. Além de sistemas naturais de grande importância como a bacia Amazônica e o Pantanal, existem também, os lagos formados pela construção de usinas hidrelétricas. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em setembro de 2003, havia registro de 517 centrais hidrelétricas em operação no Brasil, sendo 139 centrais com capacidade de geração superior a 30 MW correspondendo a 98,4% da capacidade instalada no país (ANEEL, 2005). Os reservatórios estão distribuídos ao longo de todo o território nacional e têm diferenças quanto ao bioma em que está inserido, área total, ano de construção, entre outros.

Ainda não existe consenso quanto à emissão de metano nos reservatórios brasileiros devido à diferença existente entre eles e à grande extensão dos lagos formados com a construção da barragem. Os atuais métodos para estimar o fluxo de metano, apesar de confiáveis, apresentam a desvantagem

de necessitar de grande demanda de pessoas ou de tempo para abranger uma grande área.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal aprimorar e parametrizar um modelo que permita uma estimativa da emissão de metano para a atmosfera a partir de medidas indiretas obtidas em corpos d'água.

2.2 Objetivos específicos

- Melhorar a estimativa de emissão de metano em reservatórios;
- Observar e analisar a influência de fatores que podem se relacionar à emissão de metano;
- Otimizar o processo de coleta e análise de dados que permitam uma melhor caracterização da troca gasosa de metano na interface ar-água em cada reservatório.
- Determinar o coeficiente de troca gasosa nos reservatórios de usinas hidrelétricas;
- Desenvolvimento de modelo para estimar o fluxo difusivo de metano em reservatórios de usinas hidrelétricas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O metano (CH_4) é o hidrocarboneto mais abundante na atmosfera terrestre, tendo grande importância por ser um dos principais gases indutores do efeito estufa, contribuindo com cerca de 20% do efeito observado (XIE et al., 2009; KEPPLER et al., 2006; SEINFELD; PANDIS, 1998). Ele apresenta uma forte absorção na região espectral do infravermelho ($7,66 \mu\text{m}$), onde o dióxido de carbono (CO_2) e a água (H_2O) absorvem fracamente (DONNER; RAMANATHAN, 1980; DICKINSON; CICERONE, 1986). Outro fato relevante está associado a seu potencial de aquecimento global (GWP, Global Warming Potential), num horizonte de 100 anos, que é 25 vezes maior do que o do dióxido de carbono (DALAL; ALLEN, 2008).

Análises de amostras de bolhas de ar aprisionadas em gelo polar permitiram estimar as condições da atmosfera como a razão de mistura de metano e a temperatura nos últimos 450.000 anos (Figura 3.1).

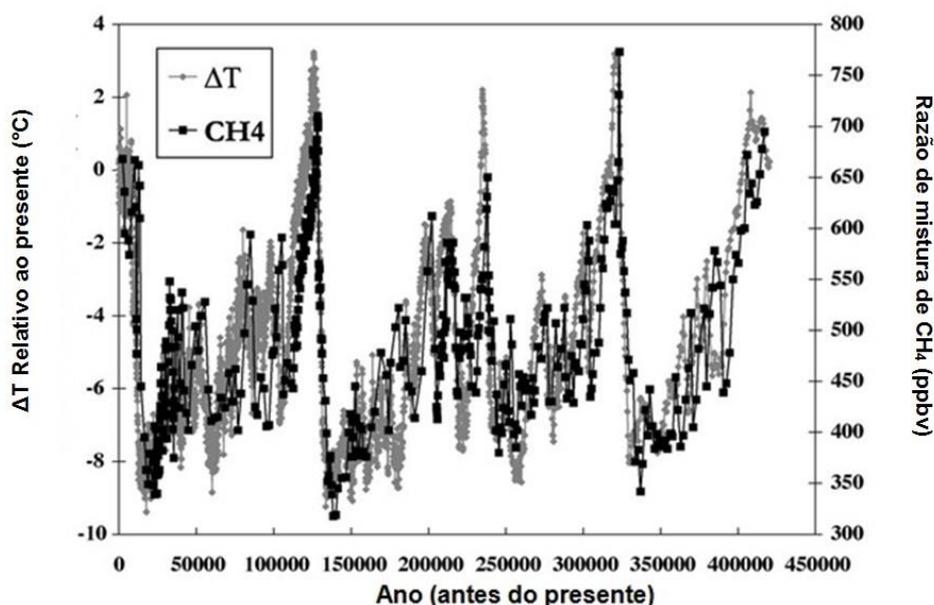


Figura 3.1: Variação da temperatura e razão de mistura de metano atmosférico nos últimos 450.000 anos.

Fonte: adaptada de Petit *et al.* (1999)

As transições do período glacial-interglacial mostraram que a variação de metano foi de 320-350 ppbv (partes por bilhão por volume) até um máximo de

650-780 ppbv. A temperatura estimada para o mesmo período sugere uma possível explicação para a oscilação do metano na atmosfera tendo em vista que os picos de razão de mistura, máximos e mínimos, coincidiram com os períodos de maior e menor temperatura, respectivamente.

Dados mais recentes obtidos através de bolhas de ar em testemunhos de gelo e monitoramento por estações mostram que o nível de metano teve um aumento significativo nos últimos 200-300 anos. A Figura 3.2 apresenta a evolução da razão de mistura de CH₄ atmosférico entre os séculos XVI e XXI.

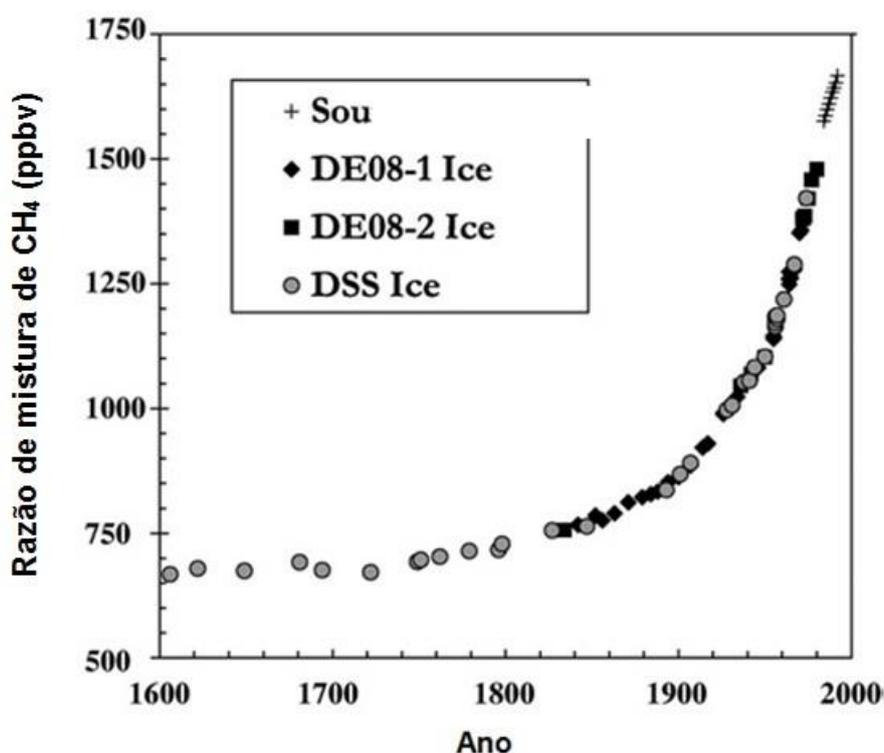


Figura 3.2: Variação da razão de mistura de metano atmosférico a partir do século XVII obtidos a partir de modelos (DE08-1 Ice, DE08-2 Ice, DSS Ice) e medições (Ar Polo Sul).

Fonte: adaptada de Etheridge *et al.* (1998)

A razão de mistura de metano até meados do século XVIII era de aproximadamente 750 ppbv. O aumento exponencial coincide com o início da Revolução Industrial que ocorreu aproximadamente no ano de 1750. Diversos estudos associam este aumento da razão de mistura de metano com o aumento das emissões associadas às fontes antropogênicas (SUBAK, 1994;

STERN; KAUFMANN, 1996). Khalil e Rasmussen (1994) observaram boa concordância entre o aumento da população, atividades agrícolas, queima de combustíveis fósseis e o aumento nas concentrações de metano atmosférico nos últimos 200 anos.

Na década de 1970 a taxa média de crescimento de metano era de 20 ppbv/ano (BLAKE; ROWLAND, 1988). Entretanto, durante as décadas de 1980 e 1990, a taxa diminuiu para 10 ppbv/ano, chegando a apenas 3 ppbv/ano em 1996, sendo observado nesse ano uma razão de mistura global média de 1730 ppbv. Posteriormente, em 2005, houve um aumento para 1774 ppbv, culminando em aproximadamente 1800 ppbv no ano de 2014 (DLUGOKENCKY *et al.*, 1998; IPCC, 2007; NOAA, 2014). A média global da razão de mistura do metano tem aumentado nas últimas décadas, embora seu crescimento não seja constante (Figura 3.3). Analisando a variação sazonal (linha azul) é possível constatar que ao longo do ano o metano apresenta picos de emissão e de consumo.

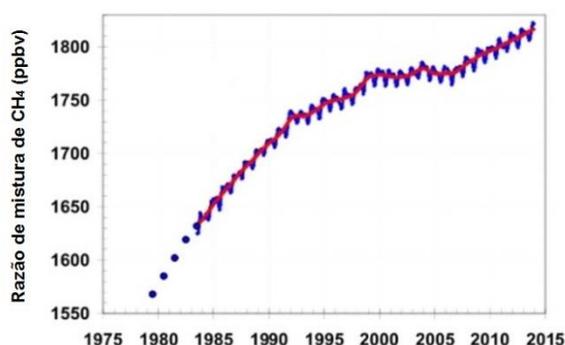


Figura 3.3: Razão de mistura atmosférica global média (linha vermelha) e a média global sazonal do metano (linha azul).

Fonte: adaptada de NOAA (2014)

As causas da variação sazonal da razão de mistura de metano atmosférico são bastante diversificados, mas invariavelmente estão associados às mudanças no balanço entre fontes e sumidouros de metano (PRANTHER *et al.*, 2001).

3.1 Fontes emissoras e sumidouros de metano

O balanço atmosférico global do metano torna-se complicado de se estimar devido ao grande número de fontes emissoras e aos diversos fatores que podem influenciar a produção e emissão do gás para a atmosfera. O metano é produzido naturalmente por microrganismos em meios livres de oxigênio (anaeróbios) como áreas alagáveis, oceanos e no processo digestivo de cupins e ruminantes selvagens. Por outro lado, ações antropogênicas são responsáveis por significativa contribuição para as emissões anuais, sendo as mais importantes relacionadas com a extração e queima de combustíveis fósseis como gás natural, carvão e petróleo, além de cultivo de extensas áreas de arroz irrigado, criação de rebanhos de bovinos que produzem metano através de fermentação entérica e aterros sanitários que criam ambientes anaeróbios ricos em matéria orgânica que favorecem a produção do gás (WUEBBLES; HAYHOE, 2002; SIMPSON *et al.*, 2006; XIE *et al.*, 2009).

Ao contrário da diversidade de fontes que geram metano, a remoção acontece por apenas três mecanismos. A principal forma de consumo do metano na troposfera ocorre por reação de oxidação com o radical hidroxila (OH). Estima-se que cerca de 85% da remoção total esteja associada à esse mecanismo (EHHALT; SCHMIDT, 1978). O restante é consumido em parte por processos bioquímicos envolvidos na absorção pelos solos através de bactérias metanotróficas (KELLER *et al.*, 1990); e outra parte é transportado para a estratosfera por processo de difusão turbulenta da circulação global onde irá se tornar a maior fonte de vapor d'água, além de reagir com o cloro (Cl), retirando-o do ciclo catalítico de destruição do ozônio (CICERONE; OREMLAND, 1988).

A Tabela 3.1 apresenta a faixa de variação anual das fontes e sumidouros de metano atmosférico baseados em informações obtidas em diversos trabalhos.

Tabela 3.1 - Faixa de variação de fontes e sumidouros de metano atmosférico.

FONTES	Tg CH ₄ ano ⁻¹	SUMIDOUROS	Tg CH ₄ ano ⁻¹
Naturais	145-260	OH Troposférico	428-507
Lagos e Áreas Alagáveis	100-231	Estratosfera	30-45
Térmitas	20-29		
Oceanos	4-15	Solos	26-43
Hidratos	4-5		
Fontes Geológicas	4-14		
Animais Selvagens	15		
Queimadas	2-5		
Antropogênicas	264-428		
Energia e Indústrias (Combustíveis Fósseis)	74-106		
Aterros Sanitários e Tratamento de Resíduos	35-69		
Ruminantes	76-92		
Plantações de Arroz	31-112		
Queima de Biomassa	14-88		
Total	503-610	Total	492-577

Fonte: Adaptado de IPCC (2007)

O grande número de fontes emissoras e a variabilidade observada tanto em fontes quanto em sumidouros torna difícil estimar com acurácia a emissão global. Segundo dados obtidos no relatório do IPCC (2007), o total de metano emitido varia de 503 a 610 teragramas (Tg CH₄ ano⁻¹), enquanto que o consumo está estimado entre 492 a 577 Tg CH₄ ano⁻¹. As variações observadas na concentração global podem ter origem nos diversos fatores que afetam o balanço, entre eles, por exemplo, alterações em práticas agropecuárias relacionadas principalmente à queima de biomassa, cultivo de arroz irrigado e criação de bovinos ou variações no clima como precipitação e temperatura. Estes fatores podem influenciar, por exemplo, processos de produção e emissão de metano em lagos e áreas alagáveis. Além disso, invernos mais rigorosos, e variações na precipitação podem influenciar nas emissões por fontes referentes à geração de energia, como a extração de carvão e queima de combustíveis fósseis (DEVOL *et al.*, 1988; CRILL *et al.*, 1988; MARANI; ALVALÁ, 2007).

Para se obter uma estimativa mais precisa do balanço global e das atuais taxas de acúmulo de metano na atmosfera faz-se necessário um melhor entendimento das fontes emissoras de metano e dos fatores que influenciam os processos de produção.

3.2 Lagos e áreas alagáveis

Lagos e áreas alagáveis, que compreendem pântanos, charcos, várzeas e sistemas intermediários entre ecossistemas terrestre e aquático, têm grande importância para o balanço global por serem a maior fonte individual de metano, com contribuição de 100 a 231 Tg ano⁻¹. A emissão nestes ambientes apresenta grande suscetibilidade a fatores tais como disponibilidade de matéria orgânica e nutrientes, presença e tipo de matéria orgânica, profundidade, pH e temperatura do meio (DEVOL *et al.*, 1988; BARTLETT *et al.*, 1988; BARTLETT *et al.*, 1990; WUEBBLES; HAYHOE, 2002; DALAL; ALLEN, 2008). A importância destes parâmetros se deve à sua potencial capacidade de alterar o processo de produção e transporte até a camada limite de troca gasosa na interface ar-água onde o gás pode ser transferido para a atmosfera.

3.3 Produção e transporte de metano em lagos e áreas alagáveis

A produção de metano em corpos d'água ocorre no substrato por ação de microrganismos denominados de arqueas metanogênicas, que necessitam de um ambiente em condições de ausência de oxigênio ou outros oxidantes como nitratos, sulfatos e óxidos de ferro. O processo químico é bastante complexo e necessita que, primeiramente, outros organismos degradem as macromoléculas da matéria orgânica existente no meio em compostos menores como ácido acético (CH₃COOH), ácidos carboxílicos, álcoois, dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂). Estas moléculas são utilizadas por arqueas metanogênicas em seu processo metabólico para obtenção de energia e carbono. Entre as diversas reações químicas envolvidas, particularmente duas resultam na formação de moléculas de metano (THAUER *et al.*, 2008; CONRAD, 1999):



O gás metano é pouco solúvel em água e a tendência é que seja transportado até a superfície, onde será emitido para a atmosfera em função do gradiente de

concentração e da velocidade de transferência gasosa entre a água e o ar. O transporte do gás ao longo da coluna d'água é realizado principalmente por dois processos: difusivo e ebulitivo (BELGER et al., 2011; CONRAD, 1996). O fluxo difusivo é caracterizado pela difusão lenta do metano dissolvido através da coluna d'água. O metano transportado desta forma pode ser consumido por organismos metanotróficos presentes em meios aeróbios através de reações de oxidação que resultam na formação de CO₂ e H₂O (DALAL; ALLEN, 2008).



No fluxo ebulitivo, a emissão do metano ocorre através de bolhas que se formam no substrato. A liberação destas bolhas, cujo conteúdo de gás pode variar entre 70 a 90% de metano, ocorre quando há superação da pressão hidrostática ocasionando seu rápido transporte pela coluna d'água. O consumo de metano pode ocorrer enquanto as bolhas ainda estão retidas no sedimento na camada mais externa onde há o contato com a água, porém a perda após a liberação da bolha é quase nula devido justamente à rápida liberação para a atmosfera (KELLER; STALLARD, 1994; BASTVIKEN *et al.*, 2004).

Desta forma, a emissão de metano em corpos d'água depende da relação entre as reações que resultam na produção do gás e o consumo até sua liberação para a atmosfera. A Figura 3.4 apresenta um esquema simplificado da dinâmica de emissão do metano.

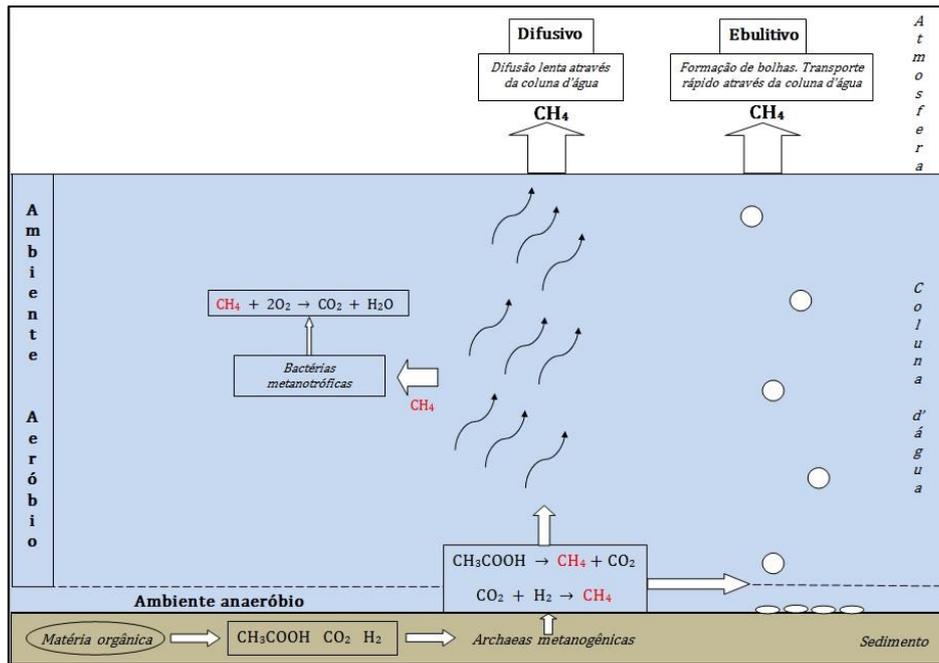


Figura 3.4: Esquema da produção, transporte e consumo de metano em lagos e áreas alagáveis.

3.4 Influência de parâmetros ambientais no fluxo de metano

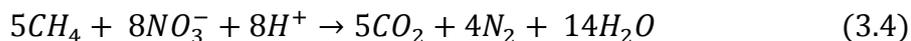
A importância dos parâmetros ambientais na emissão de metano em corpos d'água é descrita por diversos autores. No trabalho de Roslev e King (1996) foi observado que os maiores valores de fluxo difusivo ocorreram em pequenas profundidades, pois o menor deslocamento do gás até a superfície reduz a probabilidade de que seja consumido por oxidação. No caso de fluxos ebulitivos, a relação é inversamente proporcional com a profundidade e está associada à pressão hidrostática (KELLER; STALLARD, 1994). Áreas mais profundas tendem a ter menor frequência de fluxos ebulitivos, pois quanto maior for a pressão hidrostática, menor é a probabilidade da bolha se desprender do sedimento e conseqüentemente ser liberada para a atmosfera. Entretanto, outros fatores, como troca de calor e vento, podem induzir turbulência na água que aumentariam a probabilidade das bolhas se desprenderem do substrato, bem como alterar o transporte de metano na coluna d'água (ABRIL et al., 2006; BASTVIKEN *et al.*, 2004; DEVOL et al., 1988).

A temperatura é um fator que influencia diretamente a atividade dos microrganismos. A faixa ótima de produção do metano ocorre entre 15 e 37 °C (AGOSTINETTO *et al.*, 2002; YANG; CHANG, 1998; BARTLETT *et al.*, 1990). A relação da temperatura com a produção explica a importância das áreas alagáveis tropicais na emissão global do metano. A temperatura também está relacionada com a viscosidade e difusividade, fatores que influenciam diretamente a velocidade de transporte de metano na água (DEACON, 1981).

A produção do CH₄ também pode ser influenciada pelo pH da água. Segundo Yang e Chang (1998), quando o pH é inferior a 3,2 (meio ácido) ou superior a 9,3 (meio básico), ocorre a inibição na produção de metano. A adição de matéria orgânica numa área alagada tende a acidificar o meio devido ao seu caráter redutor (fornece elétrons), além de consumir o oxigênio diluído (receptor de elétrons) do meio (LANGMUIR, 1997; WANG *et al.*, 1993). Juntamente com a decomposição anaeróbica da matéria orgânica ocorrem reações de redução do NO₃⁻ para N₂O e N₂; Fe³⁺ para Fe²⁺; Mn⁴⁺ para Mn²⁺; SO₄²⁻ para S²⁻, além de acumulação de CO₂ ou sua redução a CH₄ (WANG *et al.*, 1993). O potencial de oxirredução (ORP) é um indicativo das reações de oxidação e redução existentes no meio. Essas reações estão interligadas uma vez que se uma molécula aceita elétrons, outra estará doando. A partícula que doa elétrons é oxidada, enquanto a que recebe é reduzida. A matéria orgânica é o maior redutor em ambientes aquosos naturais, enquanto que o oxigênio é o maior oxidante (LANGMUIR, 1997).

O total de sólidos dissolvidos (TSD) é uma medida associada a substâncias inorgânicas e orgânicas na água. Compostos inorgânicos referem-se a carbonatos, sulfatos, fosfatos, cloretos, entre outros enquanto que os orgânicos são produzidos pela decomposição de matéria orgânica causada por degradação microbiana e fotoquímica. Na ausência de oxigênio, carbonos orgânicos podem ser convertidos em metano através de metanogênese (ROGÉRIO *et al.*; 2013). A composição química da água pode afetar a relação entre doadores/receptores de elétrons afetando diretamente a emissão de metano. Thauer e Shima (2006) descrevem a oxidação de CH₄ em ambientes

anaeróbios por ação de microrganismos na presença de nitrato (Reação 3.4) e sulfato (Reação 3.5).



Entretanto, Schmidt e Conrad (1993) apontam casos de supersaturação de metano em lagos com elevada taxa de oxidantes e que podem ser explicados pelo transporte lateral de áreas onde o metano foi produzido em sedimentos anaeróbios.

3.5 Reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHE)

A construção de barragens e o represamento de rios é uma prática comum em diversos países, sendo responsável por diversos benefícios. Entre os mais importantes pode-se citar o controle de secas e cheias do rio, irrigação para produção de alimentos, reserva de água potável e geração de energia hidrelétrica (LIMA *et al.*, 2008). Segundo o relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o ano base de 2013, a matriz elétrica brasileira tem uma contribuição majoritária hidráulica, com cerca de 70%, e parcelas menores associadas a gás natural (11,3%), biomassa (7,6%), derivados de petróleo (4,4%), carvão e derivados (2,6%), nuclear (2,4%) e eólica (1,1%) (BEN, 2014)

A partir da década de 1990 diversos estudos apontaram o potencial para emissão de gases do efeito estufa (GEE) em reservatórios tropicais devido à grande extensão de área alagada, temperatura da água e disponibilidade de matéria orgânica proveniente de vegetação submersa e afluentes que transportam compostos de carbono para o canal principal do rio (RUDD *et al.*, 1993; ROSA *et al.*, 1994; St LOUIS *et al.*, 2000; BARROS *et al.*, 2001). Por outro lado, trabalhos mais recentes consideraram a dinâmica do reservatório e o balanço entre a emissão bruta de GEE e o consumo ligado ao metabolismo da biota aquática concluindo que os reservatórios podem também atuar como sumidouros de carbono (CHANUDET *et al.*, 2011; OMETTO *et al.*, 2011).

O problema em determinar o balanço de carbono nos reservatórios encontra-se na dificuldade de estimar com precisão a emissão e o consumo de gases do efeito estufa. O represamento e alagamento de grandes áreas criam zonas com diferentes potenciais de emissão devido ao fato que o fluxo depende da quantidade e composição da biomassa submersa. A disponibilidade de matéria orgânica durante o período de enchimento dos reservatórios baseia-se na cobertura vegetal e restos animais existentes no local que ficam submersos. A tendência é que ocorra o esgotamento dessas fontes como passar dos anos fazendo com que a entrada de carbono no sistema ocorra principalmente através dos diversos tributários que abastecem a bacia hidrográfica (ABRIL *et al.*, 2005; GUERIN *et al.*, 2006). Desta forma, a emissão pode ser influenciada por fatores como o uso da terra ao redor (agricultura, pecuária, florestas) e às variações climáticas anuais que afetam o período de seca e cheia no reservatório, além de provocarem mudanças nas condições físicas, químicas e biológicas do sistema aquático (TUNDISI, 2007; DESCLOUX *et al.*, 2011).

3.6 Fluxo de gases na interface ar-água

O fluxo de metano pode ser estimado através de câmaras estáticas, método amplamente utilizado neste tipo de estudo. Com o auxílio de uma embarcação, as câmaras são colocadas na superfície da água de forma a armazenar o metano emitido para a atmosfera. O método apresenta a vantagem de ser confiável, barato e fácil de transportar entre os pontos de amostragem. Por outro lado, tem a desvantagem de ser demorado e quase inviável em locais com correnteza ou ondas (LAMBERT; FRECHETTE, 2005). Outra forma de medir o metano seria através da instalação de sensores em uma torre para determinar o transporte turbulento do gás utilizando conceitos de micrometeorologia. O método fornece informação contínua da variação de metano no local, mas tem a desvantagem de ser dispendioso e de difícil transporte para outros pontos do reservatório, além de necessitar de locais especiais onde possa ser instalado, como pequenas ilhas distantes das margens para isolar a influência de áreas terrestres.

Uma terceira forma para estimar o metano em sistemas aquosos baseia-se na construção de equações empíricas que levem em conta a troca gasosa entre a água e a atmosfera. Entre todos os métodos, este é o que apresenta o menor custo, porém o grande desafio baseia-se na necessidade de entender os mecanismos e identificar os fatores que controlam a dinâmica de troca gasosa na interface da coluna d'água com a atmosfera.

Lewis e Whitman (1924) publicaram um dos primeiros trabalhos abordando os princípios da absorção de gases que posteriormente seria utilizado por quase todos os estudos nesta área. A Teoria de Filme Estagnado baseada na Lei de Fick que descreve casos onde não há equilíbrio químico ou térmico resultando num fluxo de partículas ou energia para homogeneizar o sistema. Desta forma, um soluto (ex: gás) inserido num ambiente onde os meios (ex: ar-água) apresentam diferença de concentração ou temperatura será transferido através da interface (também chamada de filme ou camada) por processo de difusão molecular do meio com maior concentração para o meio com menos concentração de soluto. Por convenção adotou-se que a emissão é caracterizada quando o gás é transportado da água (C_w) para o ar (C_a), enquanto que a absorção ocorre no sentido inverso (ar-água) (Figura 3.5).

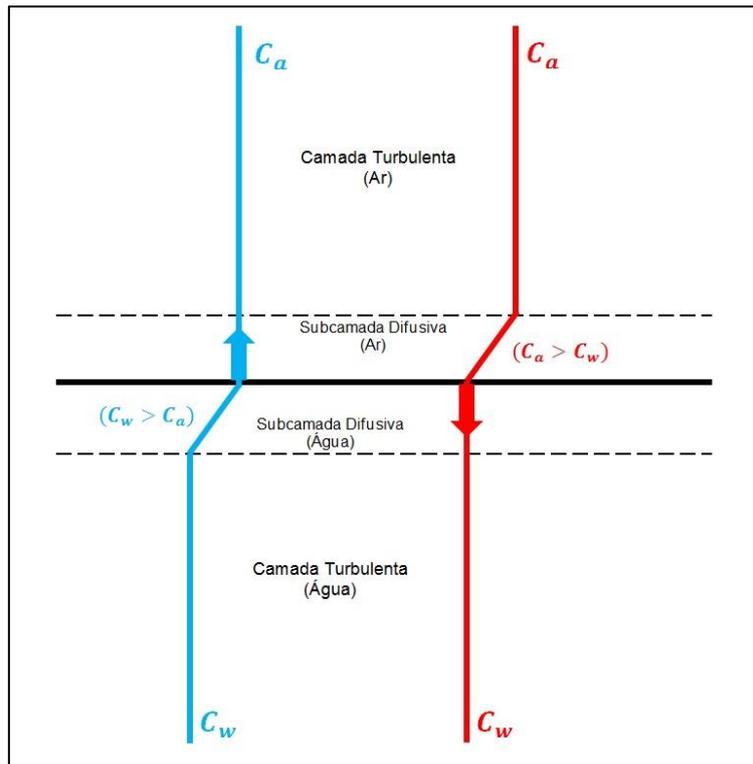


Figura 3.5: Conceito de troca gasosa em sistema de duas camadas (ar-água). A linha azul representa a emissão do gás do meio mais saturado (água) para meio menos saturado (ar). A linha vermelha representa a absorção do meio mais saturado (ar) para o menos saturado (água).
 Fonte: adaptada de Wanninkhof *et al.* (2009)

A quantidade de soluto (W) transportada de um meio para outro em função do tempo (t) pode ser expressa matematicamente por dW/dt (em grama por hora). A difusão também depende da área da superfície da interface (A , em m^2):

$$\frac{dW}{A dt} \tag{3.6}$$

A quantidade de gás trocado é igual a um coeficiente de difusão multiplicada pela diferença de concentração entre os meios:

$$\frac{dW}{A dt} = k_g(C_{\text{água}} - C_{\text{ar}}) \tag{3.7}$$

Onde k_g é o coeficiente de difusão através da camada limite (cm h^{-1}), $C_{\text{água}}$ a concentração de metano na água ($\mu\text{g l}^{-1}$) e C_{ar} a concentração de metano no ar ($\mu\text{g l}^{-1}$).

A forma mais usual da Equação 3.7 nos estudos de troca gasosa é:

$$F = k (C_w - C_a) \quad (3.8)$$

Onde (F) representa o fluxo através da interface ar-água (em $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) que depende da concentração do gás na água (C_w) e no ar (C_a) em função de uma constante de troca gasosa (k). Por convenção, entende-se que fluxos positivos ocorrem quando há transferência do gás do meio aquoso para o gasoso (emissão), enquanto que fluxos negativos expressam a absorção do gás no sentido inverso, do gasoso para aquoso.

A constante k pode ser expressa através de coeficiente de difusão molecular (D , em $\text{m}^2 \text{ s}$) do gás em função espessura da camada limite (z , em μm):

$$k = \frac{D}{z} \quad (3.9)$$

O valor de k tem dimensões de velocidade e pode ser afetado de acordo com o grau de turbulência dos fluídos em ambos os lados da camada limite, interferindo com a resistência na qual o gás é transferido entre o meio líquido e gasoso, ou por afetar a rugosidade da camada limite (LISS, 1973). Desta forma, o valor de k pode variar em função de processos físico-químicos na interface ar-água.

Nas últimas décadas diversos estudos dedicaram-se a definir o valor de k em diferentes ambientes aquáticos e à identificação dos principais fatores que afetam a velocidade de troca gasosa. A partir da década de 1960, dúvidas sobre a contribuição de oceanos como fontes ou sumidouros de gases do efeito estufa passaram a ser analisadas através de equações baseadas no valor de k devido à dificuldade em coletar dados em extensas áreas com presença de ondas (ATKINSON; RICHARDS, 1967; WILLIAMS; BAINBRIDGE,

1973; SWINNERTON; LAMONTAGNE, 1974; WANNINKHOF, 1992). Paralelamente, outros trabalhos focaram em entender o processo em ambientes controlados (LISS, 1973; LISS; SLATER, 1974; SEBACHER *et al.*, 1983; WANNINKHOF *et al.*, 2009) e posteriormente em lagos (BISCHOFF *et al.*, 1985; COLE; CARACO, 1998; SCHUBERT *et al.*, 2012). De forma geral, a estimativa do fluxo utiliza a relação apresentada por Lewis e Whitman (1924), porém a determinação de k varia de acordo com os autores. Os métodos comumente utilizados baseiam-se na solubilidade do gás dissolvido na água em função da temperatura (lei de Henry); na relação entre viscosidade e difusividade de massa (número de Schmidt), e na velocidade do vento.

Diversos autores ressaltam a importância de considerar a velocidade do vento em modelos de emissão de metano na interface ar-água (SEBACHER *et al.*, 1983; HOLMES *et al.*, 2000; FAIRALL *et al.*, 2000; WANNINKHOF *et al.*, 2009). O estudo de LISS (1973), realizado em túnel de vento, mostrou uma boa concordância entre a constante de troca gasosa e baixas velocidades de vento, mas falhava para velocidades altas, acima de 8 m s^{-1} . As ondas formadas causam um aumento da transferência gasosa maior do que a sugerida pelo modelo. Uma forma de determinar o coeficiente de troca gasosa considerando a velocidade do vento foi sugerida por Sebacher e colaboradores (1983). O experimento foi realizado com a utilização de uma câmara estática equipada com sensor de absorção de infravermelho para detecção de metano no ar e ventoinha para simular a ação do vento. O metano dissolvido na água foi determinado através de cromatografia gasosa. Os fluxos medidos foram corrigidos para temperatura da água de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ através do fator numérico de Schmidt $[(S_{c_{20}}/S_{c_T})^{-2/3}]$, conforme descrito por Deacon (1981). O termo S_c está associado à viscosidade (μ) e difusividade (D), ambos dependentes da temperatura (T). Utilizando a relação de Stokes-Einstein onde $D\mu/T$ é constante (FERREL; HIMMELBAU, 1967), o número de Schmidt pode ser obtido em função da viscosidade e temperatura onde $S_c^{-2/3}$ é proporcional a $(\mu^2/T)^{-2/3}$. Os fluxos corrigidos foram correlacionados com a concentração de

metano na interface ar-água ($C_w - C_a$) para seis velocidades de vento que variaram de 0 a $3,5 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 3.6).

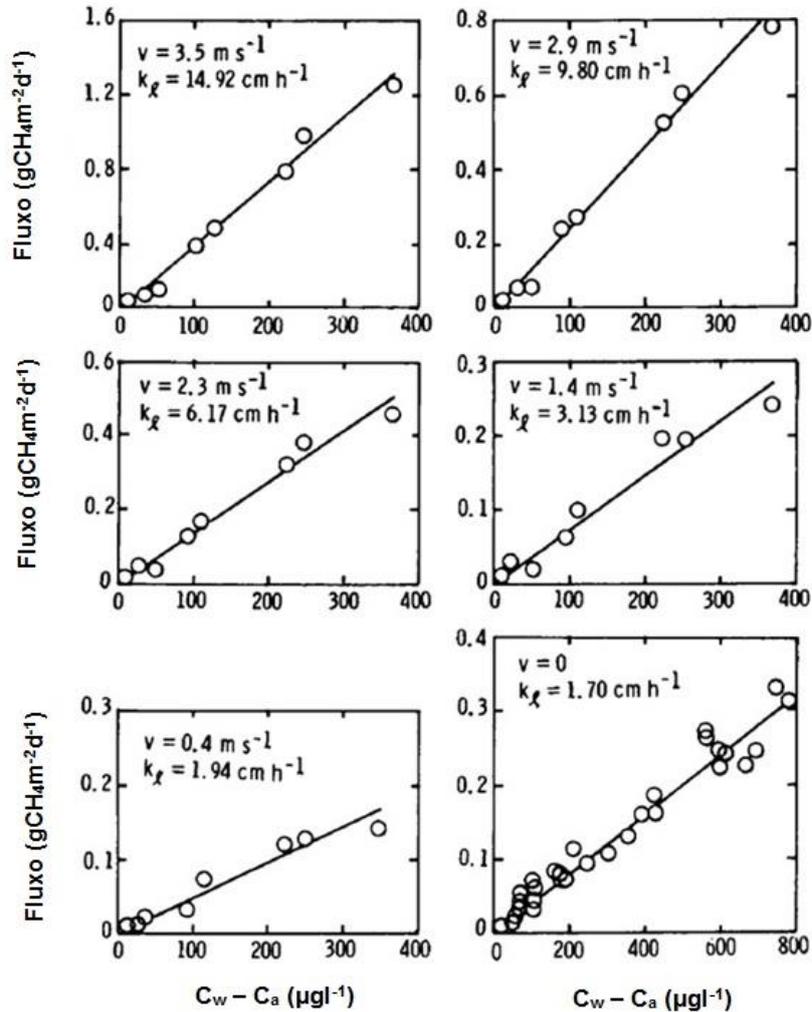


Figura 3.6: Fluxo em função da concentração de metano na interface ar-água para velocidades do vento de 0 a $3,5 \text{ m s}^{-1}$.

Fonte: adaptada de Sebacher (1983)

Desta forma, obteve-se um valor de k específico para cada velocidade do vento. A Figura 3.7 apresenta a relação das constantes de troca gasosa e a altura da onda na superfície da água em função da velocidade do vento.

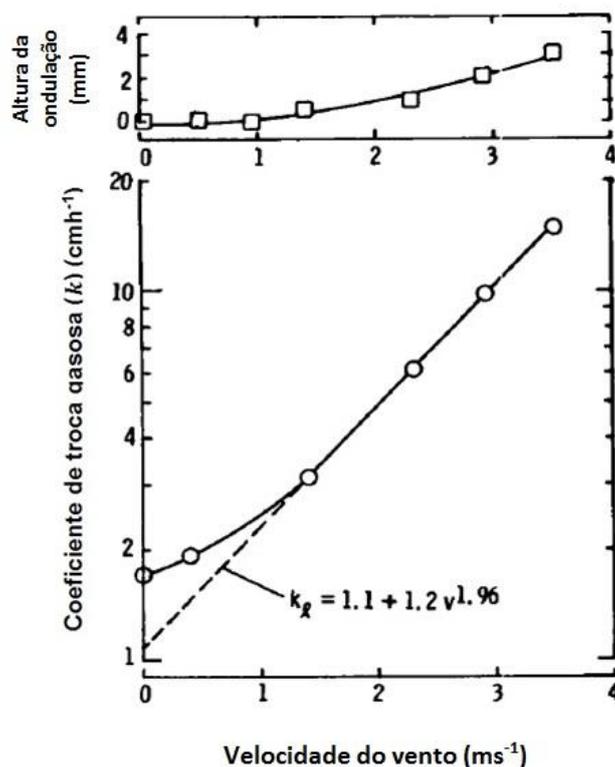


Figura 3.7: Altura da ondulação na superfície da água (acima) e coeficiente de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento (abaixo).
 Fonte: Adaptado de Sebacher, 1983.

Segundo o autor, apesar de haver aumento no coeficiente de troca inicial ($k = 1,70 \text{ cm h}^{-1}$), a variação significativa na rugosidade da superfície da água ocorreu apenas após a velocidade do vento exceder $1,4 \text{ m s}^{-1}$. A partir deste ponto, o coeficiente de troca assumiu características logarítmicas. Então, para baixas velocidades, o efeito do vento seria mínimo, podendo assumir $k = 1,70 \text{ cm h}^{-1}$ ($v = 0 \text{ m s}^{-1}$). Para ventos acima de $1,4 \text{ m s}^{-1}$ haveria a perturbação da superfície da água com conseqüente formação de ondulação e desta forma k pode ser estimado através da equação da reta em função da velocidade do vento ($k = 1,1 + 1,2v^{1,96} \text{ cm h}^{-1}$).

A utilização desta metodologia em reservatórios de hidrelétricas apresenta diversas vantagens no estudo da variação sazonal e espacial de k para a criação de modelo que permita estimar o fluxo de metano com base na concentração do gás na interface ar-água e parâmetros que afetam a velocidade de troca gasosa na camada de troca.

4 MÉTODOS

Os reservatórios de centrais hidrelétricas estudados neste trabalho estão distribuídos ao longo de todo o território brasileiro (Figura 4.1). Quatro deles encontram-se na região Norte do Brasil (Balbina, Belo Monte, Santo Antônio e Tucuruí), um no Nordeste (Xingó), um no Centro-Oeste (Serra da Mesa), três no Sudeste (Batalha, Funil, e Três Marias) e dois no Sul (Itaipu e Segredo).



Figura 4.1: Mapa com a distribuição dos reservatórios de centrais hidrelétricas e os biomas em que estão inseridos.

Fonte: adaptada de SNIF (2014).

A escolha destas hidrelétricas possibilitou a formação de um grupo com características heterogêneas. Os reservatórios estão inseridos em quatro

biomas distintos: Floresta Amazônica, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, cada um com características próprias de microclima, vegetação predominante, tipo de solo e altitude. O ano de construção das barragens apresenta grande variação, sendo as mais antigas construídas na década de 1960 (Três Marias e Funil) enquanto que as mais recentes (Batalha, Belo Monte, Santo Antônio) ainda se encontravam em fase de construção e enchimento quando foram realizadas as campanhas de coleta de dados. O tamanho da área máxima total do lago de alguns reservatórios como Funil e Xingó (40 e 60 km², respectivamente) são relativamente pequenos quando comparados com a área do lago de Serra da Mesa (1.784 km²), Balbina (2.360 km²) e Tucuruí (3.023 km²). O detalhamento da região hidrográfica, bioma, área do lago e ano de enchimento das hidrelétricas é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características gerais das hidrelétricas.

Hidrelétrica	Região Hidrográfica	Bioma	Área (km²)	Ano de enchimento	Fase
<i>Batalha</i>	Paraná	Cerrado	138	2013	Rio
<i>Belo Monte</i>	Amazônica	Amazônica	516	2015	Rio
<i>Santo Antônio</i>	Amazônica	Amazônica	271	2012	Rio-Reservatório
<i>Balbina</i>	Amazônica	Amazônica	2.360	1987	Reservatório
<i>Funil</i>	Atlântico Sudeste	Mata Atlântica	40	1969	Reservatório
<i>Itaipu</i>	Paraná	Mata Atlântica	1.350	1984	Reservatório
<i>Segredo</i>	Paraná	Mata Atlântica	81	1992	Reservatório
<i>Serra da Mesa</i>	Paraná	Cerrado	1.784	1996	Reservatório
<i>Três Marias</i>	São Francisco	Cerrado	1.040	1962	Reservatório
<i>Tucuruí</i>	Araguaia-Tocantins	Amazônica	3.023	1985	Reservatório
<i>Xingó</i>	São Francisco	Caatinga	60	1994	Reservatório

Fonte: ANEEL (2014)

Os reservatórios apresentam características gerais que os distinguem entre si, porém é necessária a identificação dos aspectos que efetivamente influenciam a emissão de metano. Para isto foram realizadas quatro campanhas de coleta de dados e materiais em cada reservatório entre março de 2011 e janeiro de 2013, respeitando intervalo de ao menos três meses entre campanhas no

mesmo reservatório. Posteriormente foi realizada coleta extra em Itaipu e Funil em março e setembro de 2013, respectivamente. No total foram realizadas quarenta e seis campanhas de coleta de dados. O número de pontos e os locais (canal principal e afluentes) variaram de acordo com o tamanho e forma do reservatório.

4.1 Caracterização dos reservatórios

A seguir é apresentada a caracterização de cada reservatório e também as principais características da região onde estão inseridos e os pontos de coleta utilizados nas campanhas. As hidrelétricas de Batalha, Belo Monte e Santo Antônio estavam na fase de rio quando as campanhas foram realizadas, com exceção da quarta campanha de Santo Antônio que já se encontrava em fase de enchimento.

➤ *Batalha*

A Usina Hidrelétrica de Batalha está localizada no rio São Marcos, um dos principais afluentes do Rio Paranaíba, e divide os estados de Minas Gerais e Goiás, nos municípios de Paracatu e Cristalina, respectivamente. O clima na região é caracterizado por um período chuvoso (outubro a março) e outro seco (abril a setembro), com médias térmicas variando de 19 a 28 °C e precipitações anuais médias de 1.500 mm. A hidrelétrica de Batalha começou a operar no início de 2013, formando um reservatório que inundou 138 km² de sua bacia de drenagem (ANEEL, 2014).

As três primeiras campanhas de coleta de dados em Batalha ocorreram em março, julho e novembro de 2011 e a quarta em novembro de 2012, em um período anterior à inundação ocasionada pela construção da barragem. No total foram dez pontos de coleta no canal principal e três em afluentes, como mostrado na Figura 4.2. O rio apresentava a característica de ser bastante pedregoso e com correnteza que o dificultava a navegação.

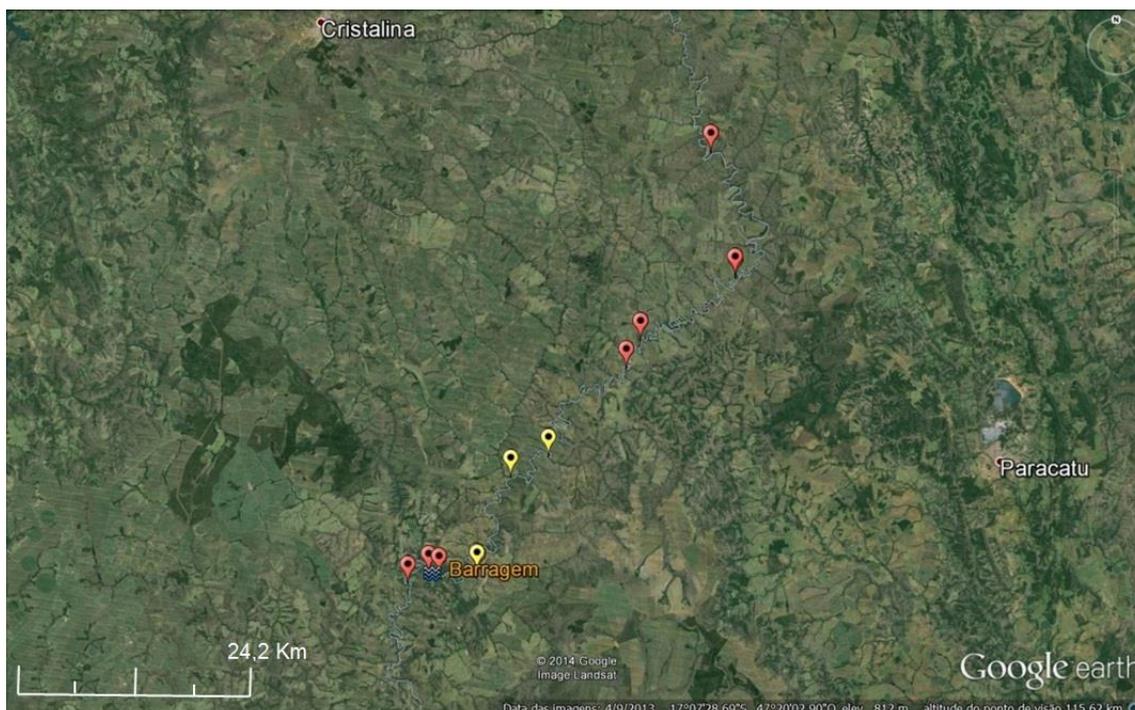


Figura 4.2: Imagem de satélite da área do futuro reservatório da UHE Batalha e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).

Fonte: Google Earth (2014)

➤ *Belo Monte*

A Usina Hidrelétrica de Belo Monte está em construção no rio Xingu, no estado do Pará, próximo à cidade de Altamira. As obras tiveram início em junho de 2011 e a previsão é de que a primeira turbina entrará em funcionamento no ano de 2015. Estima-se que o lago formado pela barragem do rio terá uma área de 503 km².

O rio Xingu é um dos principais afluentes do rio Amazonas e tem a característica de inundar periodicamente a floresta marginal durante o período de enchente (JUNK *et al.*, 1989). O regime fluvial dominante da região apresenta período de enchentes de dezembro a maio, com picos em março e abril. O período de vazante ocorre entre os meses de maio e novembro, com picos de cheia de agosto e outubro. A bacia de drenagem à montante do reservatório tem área aproximada de 450.000 km², com diferentes tipos de uso e cobertura de terra. Grande parte desta área é coberta por florestas (236.338

km²), agropecuária (33.984 km²), agricultura (16.816 km²), cerrado (11.741 km²), além de áreas menores ocupadas por floresta secundária, água, corredeiras e bancos de areia (ANEEL, 2014). As três primeiras campanhas foram realizadas em março, julho e outubro de 2012 a quarta em janeiro de 2013. Os dez pontos de coleta em Belo Monte estavam distribuídos ao longo do canal principal do rio, como mostrado na Figura 4.3.

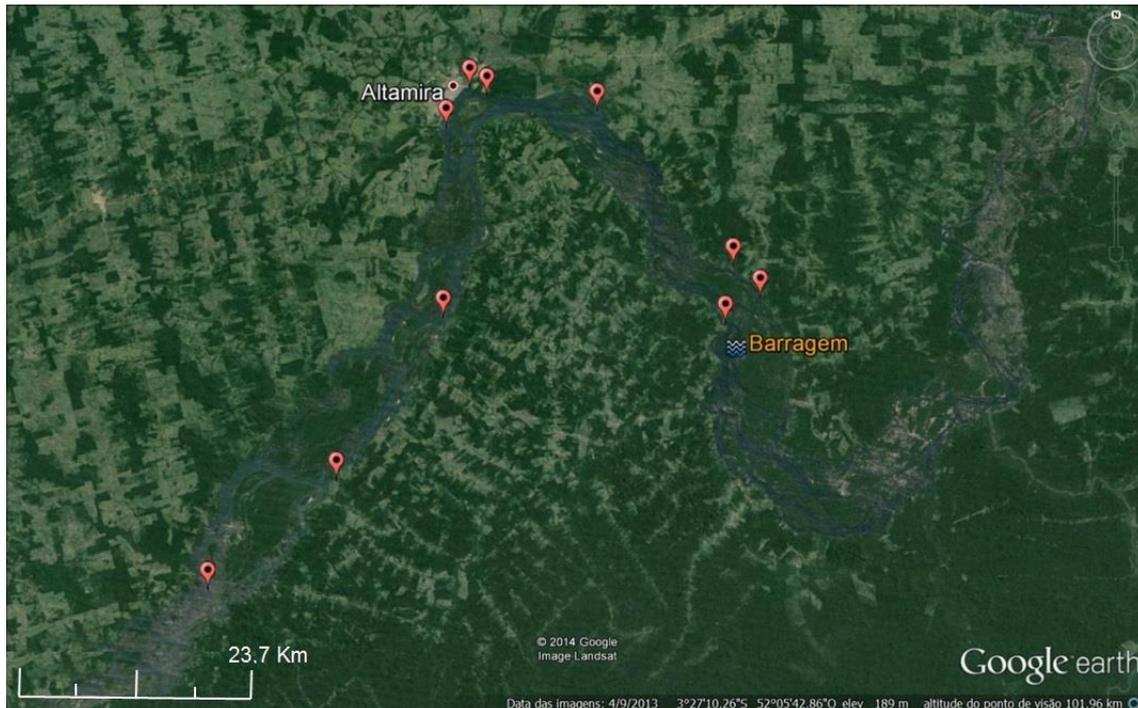


Figura 4.3: Imagem de satélite da área do futuro reservatório da UHE Belo Monte e localização dos pontos de amostragem (em vermelho).

Fonte: Google Earth (2014)

➤ *Santo Antônio*

A Usina Hidrelétrica de Santo Antônio está situada no rio Madeira, no estado de Rondônia, a 7 km de Porto Velho. A vazão do rio varia de 4 mil m³ por segundo na época da seca, a 45 mil m³ por segundo durante a cheia. A área inundada do reservatório será praticamente a mesma que ocorre durante as cheias anuais do rio Madeira (aproximadamente 350 km²). As médias de temperatura na região são próximas a 25 °C, com variação entre 9 °C e 35 °C ao longo do ano. A umidade do ar é alta, variando entre 81% em julho e 89% em dezembro. O clima quente e úmido, associados à qualidade dos solos e

outras condições geográficas proporcionam a formação de cobertura vegetal densa, abundante e diversificada. A parte brasileira da bacia de drenagem do reservatório tem aproximadamente 60% de sua área ocupada por floresta (10.431 km²), 30% com floresta secundária e pastos em pousio (5.297 km²), enquanto que o restante da área é ocupado por cerrado, água, bancos de areia e uso urbano (ANEEL, 2014). As três primeiras campanhas foram realizadas em maio, agosto e novembro de 2011 e a quarta em fevereiro de 2012 com todos os nove pontos de coleta localizados no canal principal do rio, como mostrado na Figura 4.4.

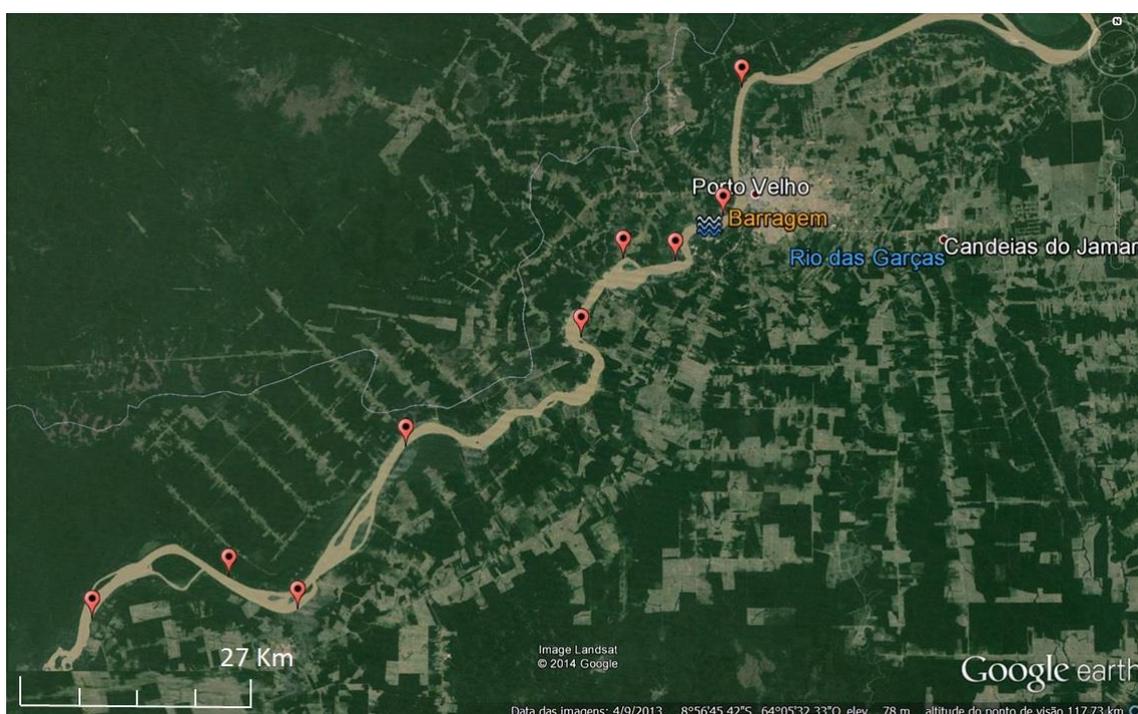


Figura 4.4: Imagem de satélite da área do futuro reservatório da UHE Santo Antônio e localização dos pontos de amostragem (em vermelho).

Fonte: Google Earth (2014)

➤ *Balbina*

A UHE Balbina está inserida no rio Uatumã, no município de Presidente Figueiredo, estado do Amazonas. A área de drenagem é de 70.600 km², enquanto que a área de inundação é de 2.360 km², com profundidade média de 7,5 metros, comprimento de 210 km e largura média e máxima de 11 e 75 km, respectivamente. O relevo plano da bacia associada à pequena amplitude

altimétrica resultou na formação de um grande lago onde ocorrem inúmeras ilhas. Parte considerável do reservatório é formada por “paliteiro” (Figura 4.5), termo usado em casos onde as árvores mortas pelo represamento ficam emersas. A área de drenagem é preenchida predominantemente por floresta (12.322 km²) e contribuições menores de agropecuária (200 km²) e floresta secundária (101 km²) (ANEEL, 2014).



Figura 4.5: Fotos ilustrando casos de árvores mortas por alagamento da área, conhecidos como “paliteiros”.

As campanhas ocorreram em março, junho, setembro e dezembro de 2012 e as medidas foram realizadas em sete pontos distintos do reservatório, sendo cinco pontos à montante (curso do rio da barragem em direção à sua nascente) e dois à jusante (curso do rio da barragem à sua foz), como mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.6: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Balbina e localização dos pontos de amostragem (em vermelho).
Fonte: Google Earth (2014)

➤ *Funil*

O reservatório de Funil localiza-se no rio Paraíba do Sul, em sua maior parte nos municípios de Itatiaia e Resende, no estado do Rio de Janeiro. O reservatório é formado por um canal principal, com cerca de 35 km e desnível de 70 m, e dois canais secundários alimentados por pequenos cursos com nascentes na bacia paulista. A área inundada é de cerca de 40 km², com profundidade média de 20 metros e máxima de 70 metros. O clima na região é caracterizado por verões quentes com temperatura média de 24 °C e estação chuvosa entre os meses de setembro e março, enquanto que no inverno a temperatura média é de 17 °C, com estação seca bem acentuada. O índice pluviométrico anual máximo atinge 2500 mm durante o verão enquanto que no inverno o índice anual mínimo é de 500 mm (ANEEL, 2014). Duas campanhas ocorreram no ano de 2011 (julho e outubro) e duas em 2012 (janeiro e maio) em oito pontos de coleta no canal principal e dois em afluentes, como mostrado na Figura 4.7. Uma quinta campanha foi realizada em setembro/2013 em

conjunto com a COPPE-UFRJ com o intuito de comparação e validação entre os dois métodos de amostragem para determinar a razão de mistura de metano.

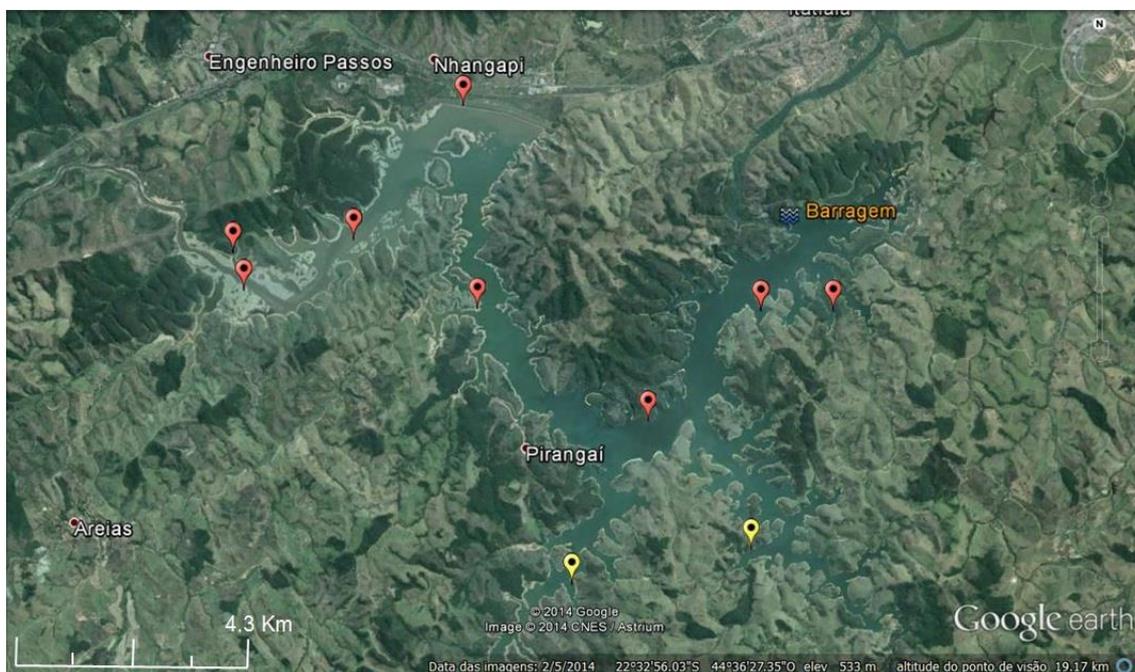


Figura 4.7: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Funil e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).

Fonte: Google Earth (2014)

➤ *Itaipu*

O reservatório de Itaipu localiza-se no Rio Paraná, a 750 km a jusante da confluência dos rios Paranaíba e Grande, na fronteira entre Brasil e Paraguai, estendendo-se da cidade de Foz do Iguaçu à Guaíra no lado brasileiro e de Ciudad del Leste até Salto del Guairá no lado paraguaio. A região encontra-se numa zona sub-tropical onde a temperatura média é de 22 °C, variando de -4 °C a 40 °C. A precipitação anual média é de 1.400 mm distribuída ao longo do ano, sem haver um período definido de seca. O uso e cobertura da terra na bacia de drenagem tem um predomínio de áreas com agricultura (69.919 km²), agropecuária (52.008 km²) e floresta (18.800 km²) (ANEEL, 2014). As quatro campanhas foram realizadas em janeiro, maio, agosto e novembro de 2012 em dezesseis pontos distribuídos ao longo do rio, sendo quatro no canal principal à

montante, onze em afluentes e um à jusante, como mostrado na Figura 4.8. Uma quinta campanha foi feita em março/2013 em conjunto com a UFPR em uma enseada protegida onde se localiza uma estação flutuante equipada com diversos sensores, entre eles, a medição de metano.



Figura 4.8: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Itaipu e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).

Fonte: Google Earth (2014)

➤ *Segredo*

O reservatório de Segredo localiza-se no rio Iguaçu, a montante da foz do rio Jordão, entre os municípios de Mangueirinha e Reserva do Iguaçu, situados à aproximadamente 285 km de Curitiba, estado do Paraná. O clima na região é caracterizado por chuvas bem distribuídas, sem período definido de seca e verões brandos. A usina entrou em operação em 1992 e o reservatório formado corresponde a menos de 2% da área total da bacia de drenagem, estimada em 34.100 km². Antes da construção do reservatório, cerca de 75% da área de drenagem era coberta por florestas. Atualmente esta área foi diminuída para 40% (1.762,50 km²), havendo um aumento da ocupação do solo com agricultura (738,88 km²), agropecuária (723,45 km²), reflorestamento (663,38

km²) e floresta secundária (525,24 km²) (ANEEL, 2014). Os dados coletados nas campanhas foram obtidos em oito pontos distribuídos ao longo do rio, sendo cinco no canal principal à montante, dois em afluentes e um à jusante, como mostrado na Figura 4.9, em janeiro, agosto, outubro e novembro de 2012.

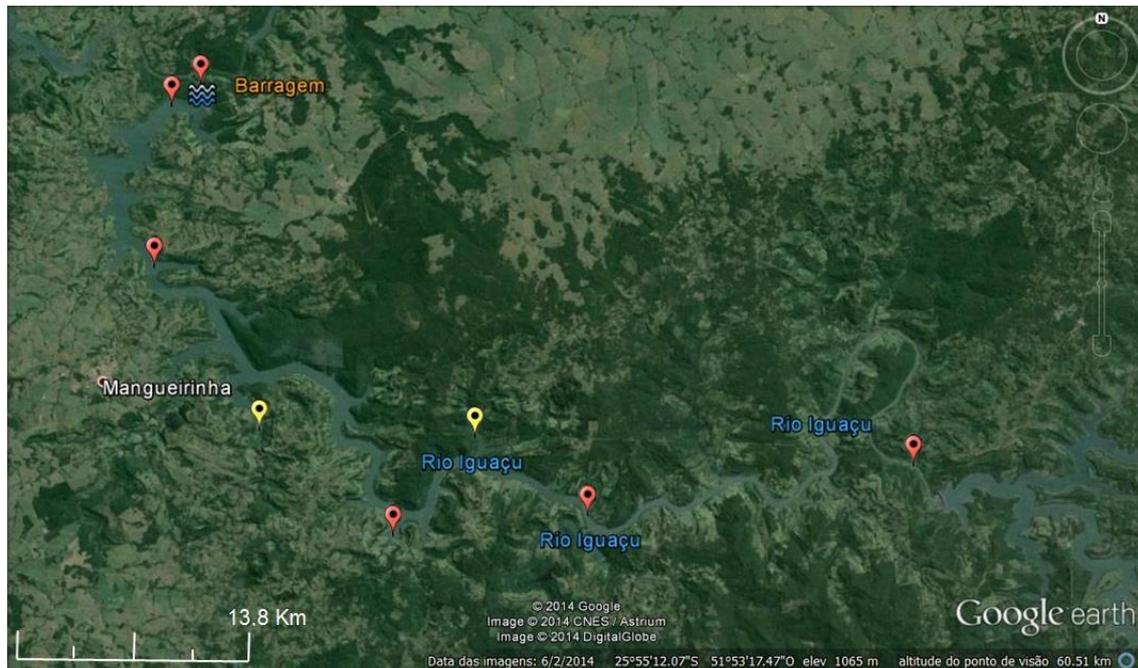


Figura 4.9: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Segredo e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).

Fonte: Google Earth (2014)

➤ Serra da Mesa

O reservatório de Serra da Mesa está situada no curso principal do rio Tocantins, no município de Minaçu, estado de Goiás, próximo à divisa com o estado de Tocantins. O reservatório de Serra da Mesa é o maior do Brasil em volume de água, com 54,4 bilhões de metros cúbicos, distribuídos numa área de 1.784 km². O clima predominante na região é do tipo tropical chuvoso com período de seca. A temperatura máxima pode atingir 40 °C no verão, enquanto que no inverno a temperatura média é de 24 °C. As estações são caracterizadas por verão úmido, com período de chuva concentrado entre os meses de novembro a março, com variação média de 1.500 a 2.000 mm

anuais, e inverno seco. O uso e cobertura da terra na bacia de drenagem do reservatório antes do início da operação em 1995 era ocupado predominantemente por cerrado (23.705,66 km²), agropecuária (16.300,84 km²) e agricultura (6.936,41 km²). Atualmente, houve aumento da atividade agropecuária (25.230,34 km²) e diminuição da área de cerrado (14.309,54 km²) e agricultura (6.101,89 km²) (ANEEL, 2014). As três primeiras campanhas ocorreram em junho, outubro e dezembro de 2011 e a quarta em abril de 2012 em onze pontos de coleta no canal principal e um em afluente, como mostrado na Figura 4.10.

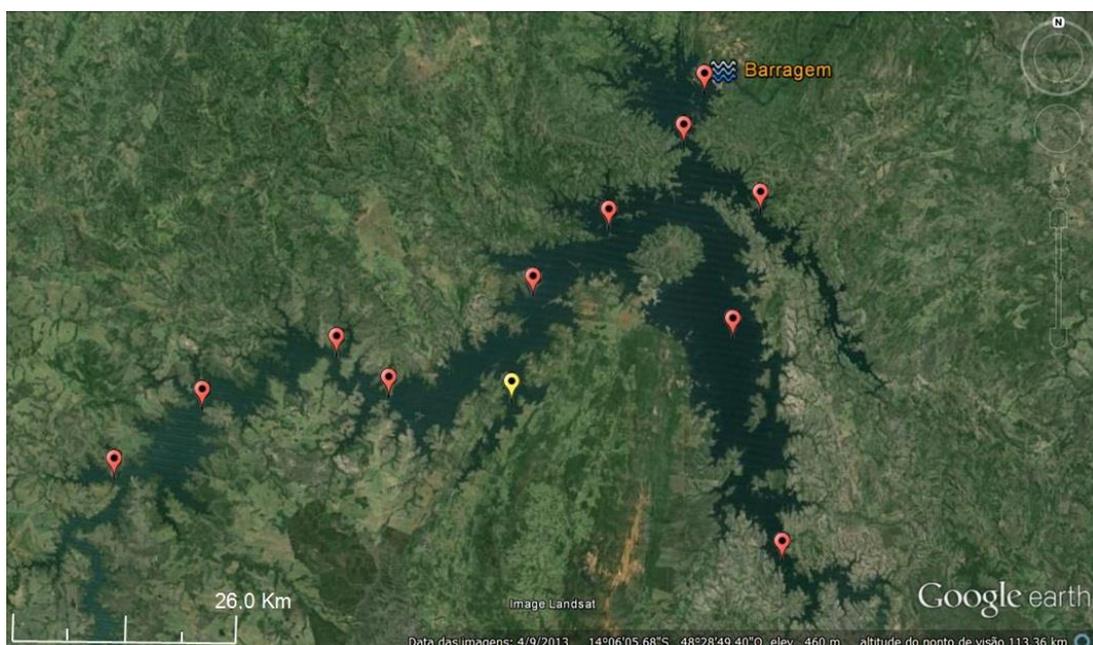


Figura 4.10: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Serra da Mesa e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).
Fonte: Google Earth (2014)

➤ *Três Marias*

O reservatório de Três Marias está localizada no rio São Francisco, na cidade de Três Marias, Minas Gerais. A estação climática na região é caracterizada por período chuvoso de outubro a março e seca que se estende de abril a setembro. A pluviosidade média anual é de aproximadamente 1200 mm, com pico entre novembro e janeiro, contribuindo com cerca de 60% do total anual precipitado. A temperatura média anual na região é de 22 °C. A usina foi

construída no final da década de 1950 com objetivo de navegação no rio São Francisco, controle de cheias, irrigação e produção de energia hidrelétrica. Atualmente, a bacia de drenagem é ocupada por agropecuária (31.222,66 km²), cerrado (9.184,20 km²), agricultura (4.548,92 km²) e floresta (4.157,55 km²) (ANEEL, 2014).

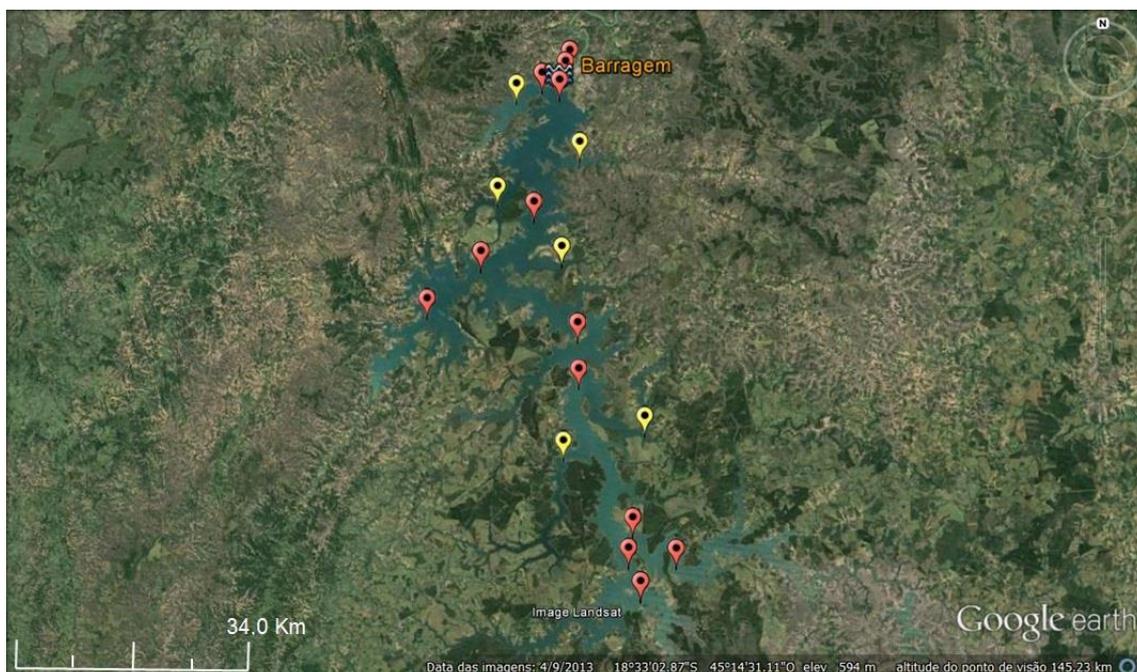


Figura 4.11: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Três Marias e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).

Fonte: Google Earth (2014)

As três primeiras campanhas ocorreram em maio, agosto e novembro de 2011 a quarta em fevereiro de 2012 em dezenove pontos distribuídos ao longo do rio, sendo onze no canal principal à montante, seis em afluentes e dois à jusante, como mostrado na Figura 4.11.

➤ *Tucuruí*

O reservatório de UHE Tucuruí situa-se no rio Tocantins, no município de Tucuruí, estado do Pará. A temperatura média anual na região é de 26 °C, com média mínima de 23 °C e máxima de 32 °C. A precipitação anual varia de 2.000 a 2.500 mm, sendo abundante de janeiro a junho e escassa de julho a

dezembro. A umidade relativa na região é elevada, podendo atingir 100% no período chuvoso e 60% na seca. Grande parte do reservatório de Tucuruí não foi desmatada antes da inundação da área resultando na formação de “paliteiros”. Atualmente, o predomínio da cobertura da terra é com agropecuária (274.185,66 km²) e cerrado (196.983,47 km²) e parcelas menores com floresta (69.509,04 km²) e agricultura (20.135,40 km²) (ANEEL, 2014).

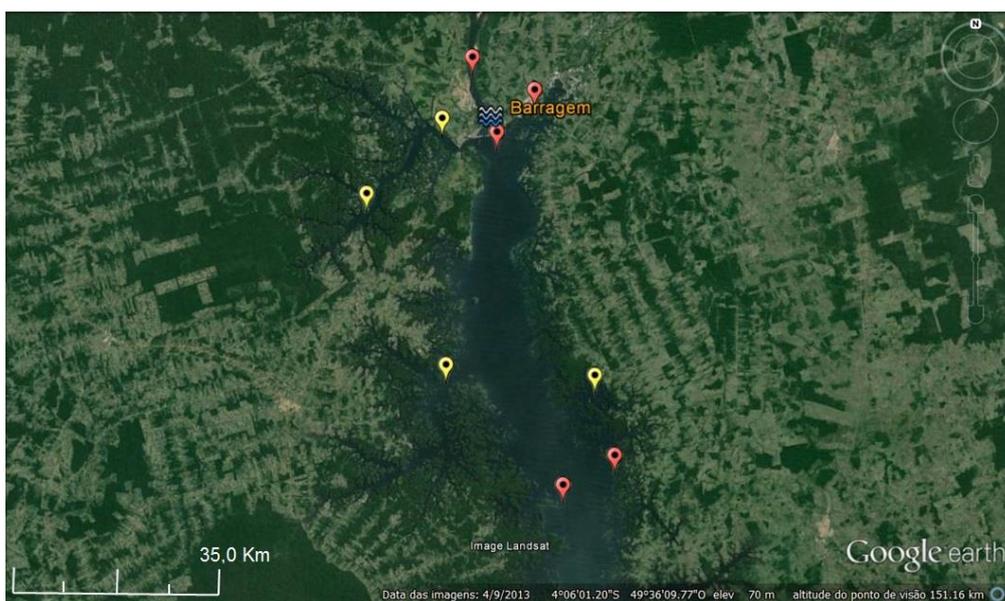


Figura 4.12: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Tucuruí e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).

Fonte: Google Earth (2014)

Os dados coletados nas campanhas foram obtidos em nove pontos, sendo quatro no canal principal à montante, quatro em afluentes e um à jusante, como mostrado na Figura 4.12, em junho, outubro e dezembro de 2011 e abril de 2012.

➤ Xingó

O reservatório de Xingó situa-se no baixo curso do rio São Francisco, nas divisas dos estados de Alagoas, Sergipe e Bahia. A inundação ocorreu em um cânion do vale do rio São Francisco, com área de drenagem de 608.700 km². A temperatura média anual da região é de 25 °C e total pluviométrico anual entre 413 e 907 mm, com pico chuvoso de maio a junho e seca entre setembro e

novembro. O uso e cobertura da terra na bacia de drenagem são compostos basicamente por agropecuária (3038,00 km²) e cerrado (883,00 km²) (ANEEL, 2014). As campanhas foram realizadas em abril, junho, setembro e dezembro de 2012 em oito pontos no canal principal e dois em afluentes, como mostrado na Figura 4.13.

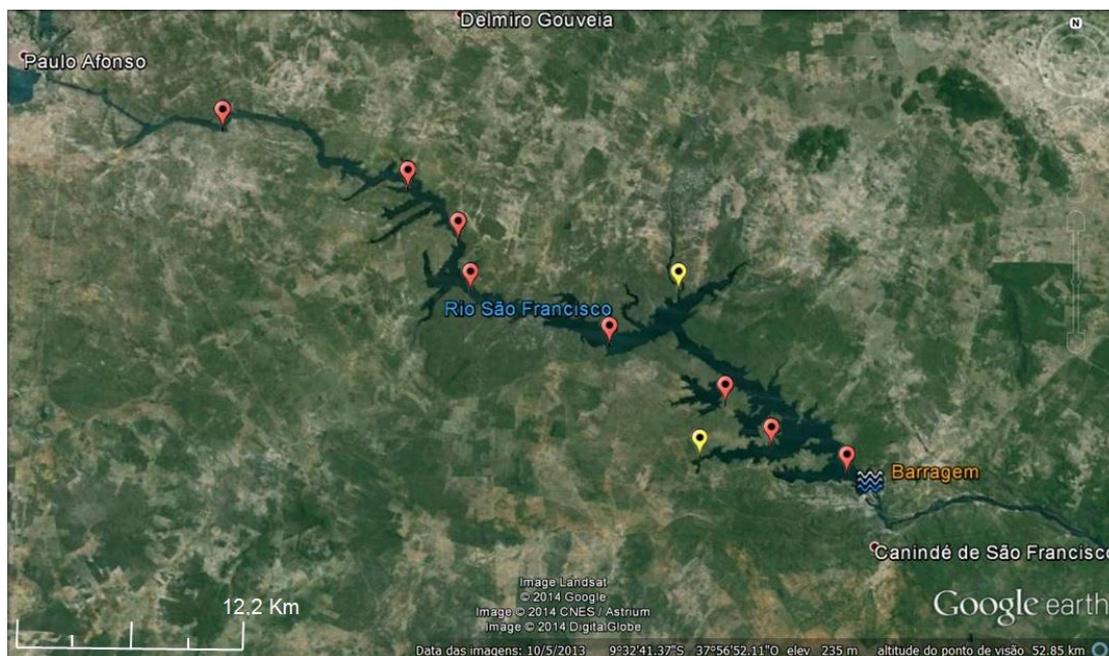


Figura 4.13: Imagem de satélite da área do reservatório da UHE Xingó e localização dos pontos de amostragem no canal principal (vermelho) e em afluentes (amarelo).

Fonte: Google Earth (2014)

4.2 Coleta de amostras para determinação do fluxo de metano

O metano emitido na superfície dos lagos e rios das hidrelétricas foi coletado através da técnica de câmara estática, descrito detalhadamente por Khalil *et al.* (1998) e Marani e Alvalá (2007). Este método é amplamente utilizado em estudos de fluxo de gases devido à simplicidade e confiabilidade na informação obtida.

Neste trabalho foram utilizadas câmaras cilíndricas de policloreto de polivinila (PVC), com volume de 26 litros, área de 0,066 m² e flutuadores de espuma acoplados externamente na base para sustentação na água. Uma manta térmica foi utilizada para cobrir a câmara no intuito de reduzir a variação de

temperatura no interior e evitar a formação de um microambiente com características diferentes do exterior.

O transporte da câmara até o ponto de amostragem era feito com o auxílio de um barco. Era respeitado um período de 10 minutos antes de se começar a coleta para eliminar a possibilidade de perturbação da superfície da água causada pela aproximação do barco, o que poderia causar a liberação do metano dissolvido de forma não natural. Em cada ponto eram utilizadas 3 câmaras de forma a aumentar a confiabilidade estatística na informação obtida.

A função da câmara estática é reter o metano que foi produzido no substrato, transportado através da coluna d'água e que seria emitido para a atmosfera. A retirada do gás do interior foi feita através de um tubo de teflon instalado à meia altura da câmara com o auxílio de uma seringa de poliuretano de 60 ml, equipada com uma torneira de três vias com trava do tipo "luerlock". De forma a evitar a estratificação do ar, a seringa acoplada era bombeada por 30 segundos antes da amostra ser coletada. Era retirado 60 ml de ar que ficava armazenado na própria seringa para posterior análise em laboratório. A Figura 4.14 apresenta o conjunto utilizado na coleta do metano formado pela câmara estática e seringa.

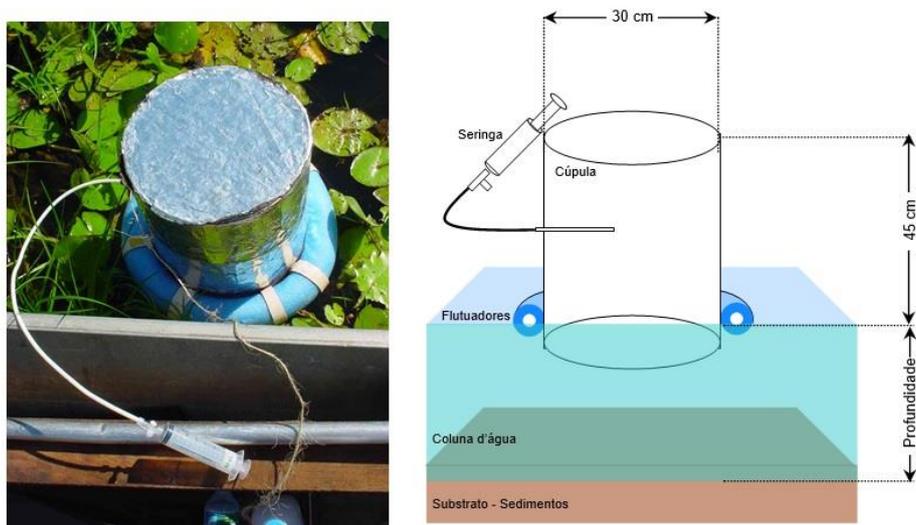


Figura 4.14: Foto de câmara estática na água (esquerda). Esquema de câmara estática acoplada a seringa para coleta de ar do interior (direita).
Fonte: adaptada de Marani (2007)

O tempo de coleta em que a câmara permanecia na água era de 9 minutos. Neste intervalo eram coletadas 4 amostras de ar, sendo a primeira no minuto inicial (logo após a câmara ser colocada na água) e as posteriores nos minutos 3, 6 e 9. Estes intervalos permitiram obter a variação da concentração do metano dentro da câmara em função do tempo e numa área de dimensão conhecida. Através da variação também foi possível determinar a forma como o metano foi transportado ao longo da coluna d'água (difusivo/ebulitivo) mediante o uso de critérios de validação.

4.3 Coleta de amostras para determinação de metano dissolvido

Nos pontos onde eram feitas as coletas para medidas do fluxo também eram coletadas amostras de água próximas à superfície para avaliar a concentração do metano dissolvido. Esta informação foi usada como um indicativo da relação entre a taxa de produção no substrato da área alagada e o consumo por organismos metanotróficos na coluna d'água, além de ser fundamental para a determinação empírica da constante de troca gasosa (k). Conforme visto na equação 6, a velocidade e até mesmo o sentido em que a troca gasosa acontece na camada limite depende das concentrações do metano na água e no ar.

O protocolo para coleta, análise e determinação das concentrações de metano dissolvido em águas naturais foi descrito detalhadamente por Marani *et al.* (2013) e baseia-se na técnica de *headspace* sugerida por Ioffe e Vitenberg (1984). As amostras de água foram coletadas a 5 cm de profundidade com seringa de poliuretano de 60 ml, equipada com torneira de três vias com trava do tipo "luerlock". O primeiro passo consistia no preenchimento de todo o volume interno com a amostra de água (Figura 4.15a). A seguir, a seringa era posicionada verticalmente de forma a expelir o excesso de líquido, mantendo apenas 30 ml de água (Figura 4.15b). Mais 30 ml de ar ambiente eram acrescentados (Figura 4.15c) e iniciava-se a agitação manual da seringa por um período de dois minutos seguidos de descanso na posição vertical por mais dois minutos (Figura 4.15d). A baixa solubilidade do metano em água garante que a maior parte do gás dissolvido seja transferido da fase aquosa para a fase

gasosa durante a agitação. Após o período de repouso, os 30 ml de ar existentes no interior da seringa eram transferidos para frascos de vidro de borosilicato de 20 ml lacrado com tampa de borracha butílica e lacre de alumínio, previamente submetidos a vácuo para retirada do ar interno. Os frascos eram armazenados ao abrigo do sol e posteriormente transportados para laboratório onde era determinada a razão de mistura de metano. A existência de metano residual na amostra de água após a extração pela técnica de “*headspace*” não foi possível de ser analisada neste trabalho.

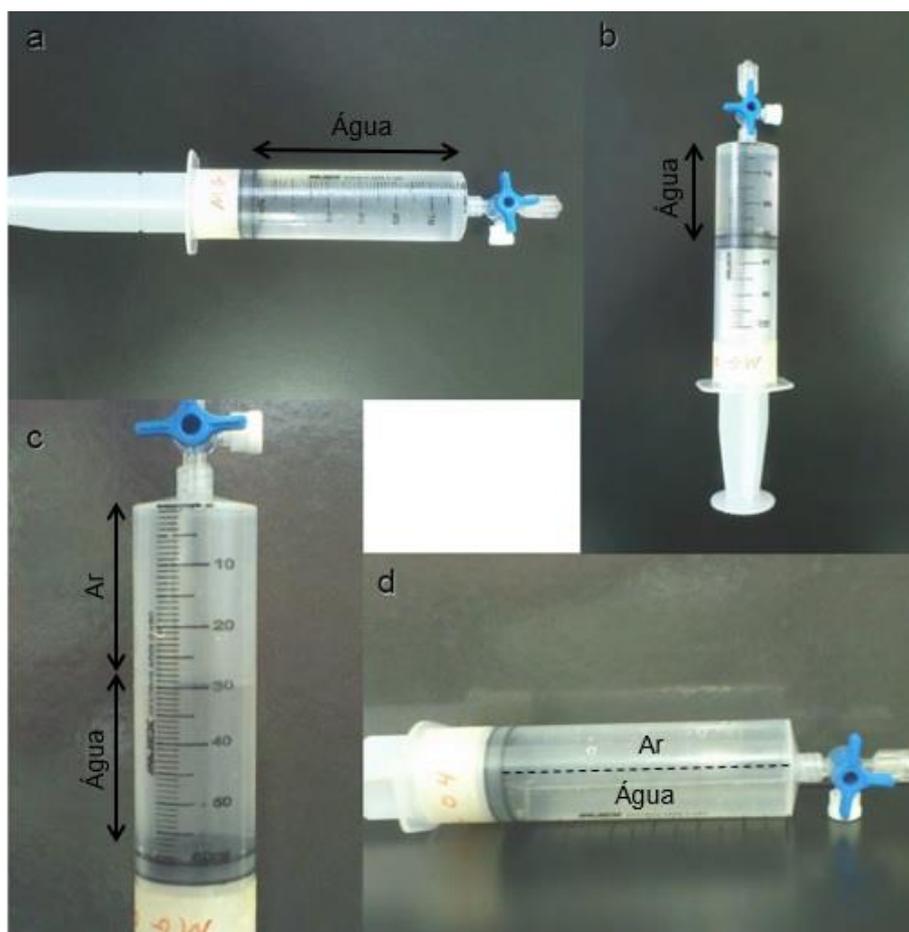


Figura 4.15: Técnica de headspace. (a) coleta da amostra, (b, c) preparação da amostra para aplicação da técnica, (d) repouso para que o equilíbrio seja atingido.

Fonte: adaptada de Marani *et al.* (2013)

Entretanto, deve-se considerar que o ar atmosférico usado no processo continha uma razão de mistura de metano. Para excluir esta variável da equação de cálculo de metano dissolvido na água, uma amostra de ar ambiente era coletada para determinar sua razão de mistura de metano.

4.4 Análise laboratorial – Cromatografia gasosa

A cromatografia pode ser definida como um processo físico-químico de separação onde os constituintes da amostra são distribuídos entre uma fase estacionária e uma fase móvel (CIOLA, 1985). Essa técnica é amplamente usada em estudos de metano devido à grande precisão, sensibilidade e linearidade obtida, sendo muito eficaz na determinação de gases-traço (ALVALÁ, 1995).

No processo de cromatografia, a amostra de ar é injetada na coluna cromatográfica (fase estacionária) através de um sistema de “*loop*” onde um gás de arraste (fase móvel) transporta a amostra até o detector. As diferenças entre a interação dos constituintes da amostra com o material que compõe a coluna fazem com que cada constituinte percorra em diferentes tempos, ocasionando na separação dos constituintes. O detector, altamente sensível a compostos orgânicos, capta a corrente elétrica produzida pela formação de íons e elétrons originados na queima da amostra. O sinal gerado quando o metano passa pelo detector é enviado a um computador que gera um gráfico, denominado de cromatograma. A razão de mistura do metano na amostra é determinada pela área do cromatograma gerado.

A análise de todas as amostras (fluxo e metano dissolvido) foi realizada no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos, São Paulo. Utilizou-se um cromatógrafo a gás (Shimadzu, GC-14), equipado com detector de ionização de chama (Flame Ionization Detector, FID), um *loop* de amostragem de 2,2 ml e duas colunas empacotadas otimizadas para a análise de metano. A primeira, com comprimento de 2,5 metros e 1/8” de diâmetro, é revestida com sílica gel e tem a finalidade de remover vapor d’água, CO₂ e outros compostos orgânicos pesados existentes na amostra, reduzindo assim o tempo total de análise. A segunda coluna (3 metros de comprimento e 1/8” de diâmetro), preenchida com peneira molecular de zeólito de 5 Å separa o metano da amostra e o conduz até o detector. O gás

padrão utilizado para a calibração tem razão de mistura de metano de 1804 ± 2 ppbv).

4.5 Determinação dos fluxos de metano

Para cada fluxo a razão de mistura das amostras obtidas através da cromatográfica foi distribuída em um gráfico em função do tempo. Este método permite a quantificação do fluxo de metano assim como a determinação do tipo de transporte do gás na coluna d'água. A Figura 4.16 mostra a variação temporal da razão de mistura de metano no interior da câmara para um caso típico de: (a) fluxo difusivo, onde há um aumento linear da razão de mistura ao longo do tempo; e (b) fluxo ebulitivo, sendo possível observar a ocorrência de bolhas entre o minuto inicial e o minuto 3 que provoca um aumento abrupto da razão de mistura de metano dentro da câmara.

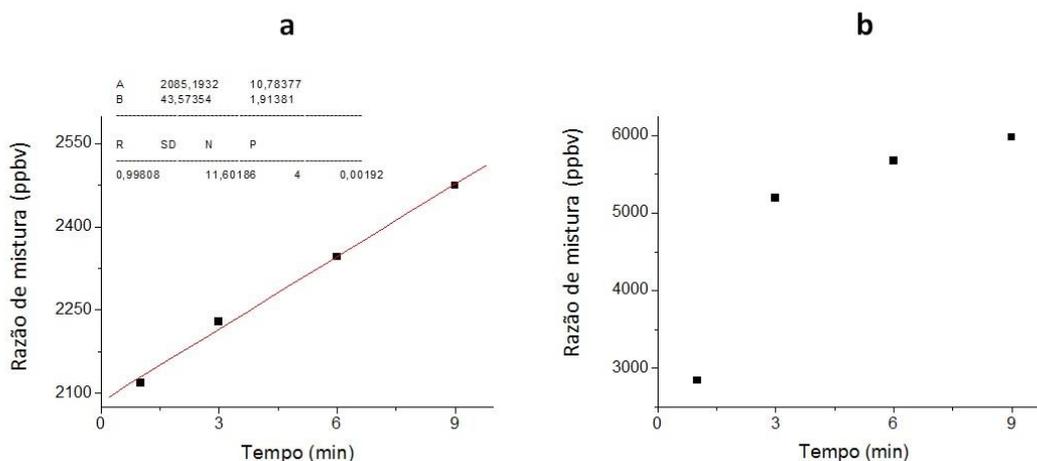


Figura 4.16: Variação temporal da razão de mistura de metano medido no interior da câmara para fluxos difusivos (a) e fluxos ebulitivos (b).

4.6 Validação dos fluxos e identificação do tipo de transporte

Os critérios de validação são utilizados em diversos estudos sobre emissão de metano (SASS *et al.*, 1992; KHALIL *et al.*, 1998; MARANI; ALVALÁ, 2007) para garantir a confiabilidade da informação e excluir fluxos provenientes de amostras que podem ter sido contaminadas ou coletadas de forma incorreta.

Além disso, têm a finalidade de classificar e separar os fluxos em difusivo e ebulitivo.

O primeiro critério baseia-se no coeficiente de determinação (R^2) da reta de regressão entre os valores de razão de mistura e seus respectivos tempos. Valores superiores a 0,9 estão associados à linearidade característica de um fluxo difusivo, que apresenta uma emissão praticamente constante, sem mudanças significativas durante o período de coleta. Porém, podem acontecer casos onde houve a entrada de bolhas ao longo de todo o tempo em que a câmara permaneceu na água resultando numa correlação acima de 0,9. Apesar de pouco comuns, faz-se necessário um segundo critério para que não haja dúvidas na classificação do fluxo. Para isto, deve-se comparar o valor da razão de mistura inicial χ_0 (para $t = 0$), obtido através da reta de regressão linear ($\chi = \chi_0 + bt$), com a razão de mistura do ar ambiente. Fluxos que respeitaram o primeiro critério e tiveram valor de χ_0 próximo à razão de mistura ambiente medida são classificados como válidos e difusivos.

Fluxos ebulitivos, mesmo que eventualmente passem pelo primeiro critério, não passam pelo segundo. Nestes casos foi feita análise para determinar a ocorrência de bolhas durante a coleta, caracterizadas pelo crescimento abrupto da razão de mistura medida no interior da câmara (SMITH *et al.*, 2000). Adotou-se ainda um terceiro critério de validação para eliminar fluxos que apresentassem uma razão de mistura na primeira amostra muito acima da razão de mistura do ar ambiente. Esta medida foi utilizada para evitar casos onde as bolhas possam ter sido liberadas devido a perturbações na água decorrentes da aproximação do barco e instalação da câmara.

4.7 Cálculo para quantificação do fluxo

A razão de mistura de metano (χ_{CH_4}) em uma amostra de gás pode ser escrita como a razão entre sua pressão parcial (p_i) e a pressão total (p_t), ou pela razão entre o número de moles de CH_4 (n_{CH_4}) e o número total de moles da mistura (n_t).

$$\chi_{CH_4} = \frac{n_{CH_4}}{n_t} \quad (4.1)$$

Por sua vez, o número de moles de uma substância pode ser expresso pela razão entre a massa da substância (m_{CH_4}) e sua massa molar (M_{CH_4}). Temos então que:

$$n_{CH_4} = \frac{m_{CH_4}}{M_{CH_4}} \quad (4.2)$$

Sabendo que a equação dos gases ideais é expressa por:

$$pV = nRT \quad (4.3)$$

Onde p é a pressão do gás (atm), V = volume (L), n = número de moles (mol), R = constante dos gases ideais ($0,082 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) e T = temperatura (K). Substituindo a Equação 4.2 na Equação 4.3, temos:

$$pV = \frac{m_{CH_4}}{M_{CH_4}} RT \quad (4.4)$$

Adotando-se uma variação no número de moles de metano (Δn_{CH_4}) e utilizando a Equação 4.4 pode-se escrever:

$$\frac{\Delta n_{CH_4}}{n_t} = \frac{\Delta m_{CH_4} RT}{M_{CH_4} pV} = \Delta \chi_{CH_4} \quad (4.5)$$

Ou

$$\Delta m_{CH_4} = \frac{\Delta \chi_{CH_4} pV M_{CH_4}}{RT} \quad (4.6)$$

Admitindo-se que a variação do fluxo através da área A (m^2) é constante durante um intervalo de tempo Δt , pode-se escrever o fluxo F_{CH_4} (em $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) como:

$$F_{CH_4} = \frac{\Delta \chi_{CH_4} pV M_{CH_4}}{\Delta t A R T} = \frac{pV M_{CH_4}}{A R T} \frac{\Delta \chi_{CH_4}}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Expressando a Equação 4.7 em função das derivadas da razão de mistura e tempo, temos:

$$F_{CH_4} = \frac{pVM_{CH_4}}{ART} \frac{\partial \chi_{CH_4}}{\partial t} \quad (4.8)$$

O segundo termo da Equação 4.8, $\partial \chi_{CH_4} / \partial t$, se refere à variação da razão de mistura de metano no interior da câmara em função da variação do tempo, enquanto que os valores do primeiro termo são conhecidos ou medidos diretamente no momento da coleta. A grandeza de $\partial \chi_{CH_4} / \partial t$ é obtida através da reta de regressão linear ($\chi = \chi_0 + bt$), onde $b = \partial \chi_{CH_4} / \partial t$.

Em casos onde não há variação constante do fluxo durante o intervalo de tempo Δt , a exemplo da ocorrência de bolhas, o procedimento para determinação do fluxo médio baseou-se na diferença entre as concentrações final e inicial, divididos pelo tempo total de coleta.

4.8 Determinação da razão de mistura de metano dissolvido

Utilizando a lei dos gases ideais é possível determinar a concentração de metano extraído das amostras de água através da técnica de *headspace*. Sabendo que:

$$\frac{p_{CH_4}}{p_t} = \frac{n_{CH_4}}{n_t} \Rightarrow p_{CH_4} = \frac{n_{CH_4}}{n_t} p_t \quad (4.9)$$

Onde p_{CH_4} é a pressão parcial do CH_4 , p_t é a pressão total, n_{CH_4} é o número de moles de CH_4 e n_t é o número total de moles da amostra. Considerando novamente a equação dos gases ideais:

$$pV = nRT \Rightarrow p_{CH_4}V = \frac{m_{CH_4}}{M_{CH_4}} RT \quad (4.10)$$

Onde V é o volume da amostra, R é a constante dos gases ideais e T a temperatura, podemos escrever:

$$m_{CH_4} = p_{CH_4} \frac{VM_{CH_4}}{RT} \quad (4.11)$$

Substituindo a Equação 4.9 em 4.11, temos:

$$m_{CH_4} = \left(\frac{n_{CH_4}}{n_t} p_t \right) \frac{VM_{CH_4}}{RT} \quad (4.12)$$

Lembrando que a razão de mistura do metano pode ser expressa por:

$$\chi_{CH_4} = \frac{n_{CH_4}}{n_t} \quad (4.13)$$

Substituindo a Equação 4.13 em 4.12, temos:

$$m_{CH_4} = \frac{p_t V}{RT} M_{CH_4} \chi_{CH_4} \quad (4.14)$$

Assim, obtemos a massa de metano por unidade de volume contida na amostra de água extraída das represas:

$$\frac{m_{CH_4}}{V} = \frac{p_t M_{CH_4}}{RT} \chi_{CH_4} \quad (4.15)$$

Os resultados estão expressos em microgramas de metano por litro de água ($\mu\text{g/l}$).

4.9 Parâmetros ambientais

A medição dos parâmetros ambientais da coluna d'água foi realizada em todos os pontos de coleta utilizando uma sonda multiparâmetros de qualidade de água da marca Horiba, modelo U-51. A Tabela 4.2 descreve todos os parâmetros medidos, assim como a faixa de medida, resolução e precisão obtidos pelo equipamento.

Tabela 4.2 – Parâmetros da água, faixa de medida, resolução e precisão.

Parâmetro	Faixa de medida	Resolução	Precisão
<i>Temperatura d'água</i>	-5 ° até 55 °C	0,01 °C	-
<i>pH</i>	0-14	0,01	±0,1
<i>Potencial de oxirredução (ORP)</i>	-2000 ~ +2000 m V	1 m V	±15 m V
<i>Oxigênio dissolvido (OD)</i>	0-50 mg/l	0,01 mg/l	0-20 mg/l: ±0,2mg/l 20-50 mg/l: ±0,5 mg/l
<i>Total de sólidos dissolvidos (TSD)</i>	0-100 g/l	0,1% da escala total	±5 g/l
<i>Temperatura d'água</i>	-5 ° até 55 °C	0,01 °C	-

Medidas complementares foram realizadas para obter dados de outras características relevantes. A profundidade nos pontos de coleta foi estimada através de régua graduada. A pressão atmosférica e temperatura do ar foram medidas com aparelho portátil da Oregon Scientific, modelo EB-833, enquanto que a velocidade do vento foi medida com anemômetro portátil da marca Lutron, modelo AM-4201.

4.10 Análise estatística

A emissão de metano em sistemas aquosos é o resultado da produção de metano no substrato e seu consumo ao longo da coluna d'água. Estes dois mecanismos estão sujeitos a influências dos parâmetros físico-químicos do substrato e da água. Neste trabalho foi aplicada a Análise de Componentes Principais (ACP) para avaliar a participação estatística dos parâmetros da água e da atmosfera neste processo. Este é um método estatístico bastante utilizado em estudos com diversas variáveis que possibilita identificar o conjunto de parâmetros estatisticamente significativos responsáveis pela variação no fluxo de metano.

Como descrito por Wilks (2006), a ACP consiste essencialmente em reescrever as coordenadas das amostras em outro sistema de eixo mais conveniente para a análise de dados. Partindo de n de variáveis originais é possível obter,

através de combinações lineares, n -componentes principais, cuja principal característica, além da ortogonalidade, é que são obtidos em ordem decrescente de máxima variância. Ou seja, a componente principal 1 detém mais informação estatística relevante que a componente principal 2, que por sua vez tem mais informação que a componente 3 e assim por diante.

Este método permite a redução da dimensionalidade dos pontos representativos das amostras, pois, embora a informação estatística presente nas n -variáveis originais seja a mesma dos n -componentes principais, é comum obter em apenas 2 ou 3 componentes principais mais de 90% da informação estatisticamente significativa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo utilizou dados obtidos nas campanhas destinadas à execução do Projeto Estratégico “Monitoramento de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas” da Chamada Pública nº 009/2008 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O projeto conta com a participação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental (IIEGA), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE-UFRJ), Laboratório Central (LACEN), Universidade Federal do Pará (UFPA), Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Os objetivos gerais do projeto visam estabelecer diretrizes para estudos de emissões de gases do efeito estufa em hidrelétricas, além de padronizar métodos de amostragem, coleta e análise. Ressalta-se que mais da metade das 46 campanhas já haviam sido realizadas quando se definiu os objetivos deste trabalho o que não permitiu aplicar o método desenvolvido em todos os reservatórios.

As tabelas contendo os valores médios de fluxo de metano, metano dissolvido e parâmetros ambientais em cada campanha para todas as hidrelétricas são apresentadas no Apêndice A ao final deste trabalho.

5.1 Comparação do fluxo de metano nos reservatórios

Através das amostras de ar coletadas com câmaras estáticas e utilizando os critérios de validação foi possível determinar a contribuição média de fluxos difusivos e ebulitivos em cada reservatório. Esta análise é importante para o estudo da constante de troca gasosa na interface ar-água, uma vez que esta determinação só é possível em pontos onde há o acúmulo de metano proveniente de difusão através da coluna d'água. Fluxos ebulitivos não são considerados, pois são liberados imediatamente para a atmosfera após se desprenderem do substrato. A Figura 5.1 apresenta a relação do número total de fluxos difusivos e ebulitivos ocorridos ao longo de todas as campanhas em

cada reservatório. Os nomes foram substituídos por siglas para melhor apresentação: Batalha (BAT), Belo Monte (BM), Santo Antônio (STA), Balbina (BAL), Funil (FUN), Itaipu (ITA), Segredo (SEG), Serra da Mesa (SM), Três Marias (TM), Tucuruí (TUC) e Xingó (XIN).

Observou-se que em todos os reservatórios a emissão através de fluxo difusivo ocorreu com maior frequência. Os poucos casos de fluxos ebulitivos foram registrados em sua maioria em áreas protegidas com pouca movimentação de água ou em pontos na jusante. A passagem da água pelas turbinas pode liberar o metano dissolvido devido à sua característica de ser pouco solúvel em água. Como a saída das turbinas localiza-se abaixo da superfície da água, grande parte do metano liberado é transportado instantaneamente na forma de bolhas (SANTOS *et al.*, 2008; BAMBACE *et al.*, 2007).

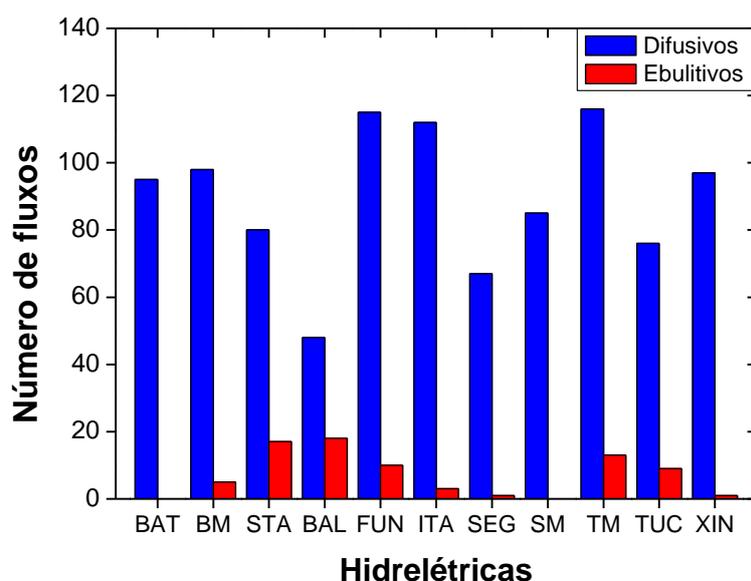


Figura 5.1: Número de fluxos difusivos (azul) e ebulitivos (vermelho) nos reservatórios de usinas hidrelétricas.

Entretanto, os valores de fluxo ebulitivo em todos os reservatórios foram significativamente maiores quando comparados aos fluxos difusivos (Figura 5.2).

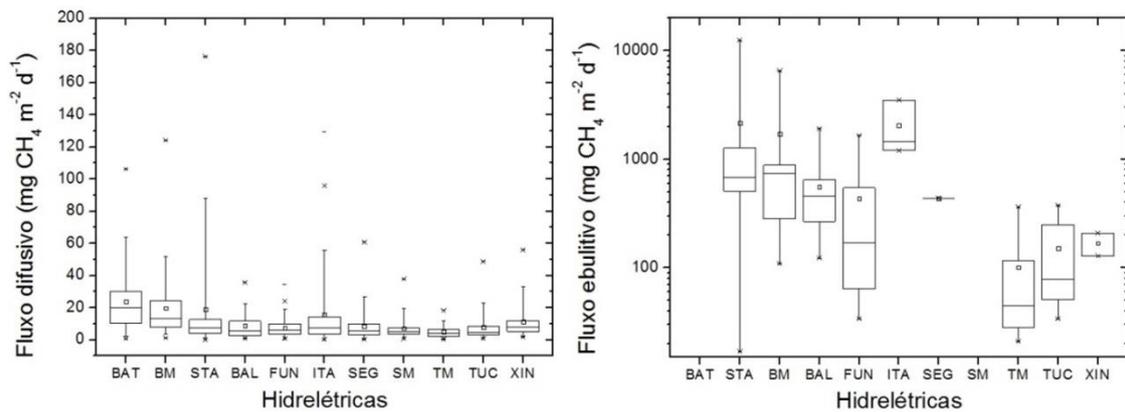


Figura 5.2: Box-plot comparativo do fluxo difusivo (esquerda) e fluxo ebulitivo (direita) nos reservatórios.

Considerando os fluxos de todos os reservatórios temos que a média total de fluxos difusivos foi de $12,4 \pm 16,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($n = 989$) e para ebulitivos foi de $888,6 \pm 1872,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($n = 88$). Os três reservatórios que estavam em fase de pré-enchimento (Batalha, Belo Monte e Santo Antônio) apresentaram média de fluxo difusivo superior aos demais. O mesmo foi observado em relação à média dos ebulitivos, com exceção de Batalha e Serra da Mesa que não tiveram nenhum fluxo ebulitivo, e Itaipu que teve apenas três casos na terceira campanha, todos em um mesmo ponto afastado do canal principal e próximo à margem de uma área com atividade agrícola. Os fluxos ebulitivos observados nos demais reservatórios ocorreram à jusante da barragem após a passagem da água pelas turbinas. Por outro lado, as menores médias de fluxo difusivo estão associadas a reservatórios mais antigos, como Funil, Três Marias e Tucuruí, construídos em 1969, 1962 e 1985, respectivamente.

Como o objetivo principal deste estudo foca nas interações de troca gasosa na superfície da área alagada, os fluxos ebulitivos não serão incluídos na continuidade das análises por terem uma mecânica diferente de liberação para a atmosfera.

5.2 Fluxo difusivo x Parâmetros ambientais: Análise estatística

A análise dos parâmetros ambientais visou identificar as características físico-químicas do meio que influenciam a emissão de metano e se essas

características são comuns a todos os reservatórios. A Tabela 5.1 apresenta a média dos parâmetros baseados nos valores medidos em todas as campanhas efetuadas em cada reservatório: profundidade (Prof), temperatura do ar (Temp Ar) e da água (Temp Água), pH, potencial de oxirredução (ORP), oxigênio dissolvido (OD) e total de sólidos dissolvidos (TSD).

Tabela 5.1 – Média e desvio padrão dos parâmetros ambientais medidos em todas as campanhas para cada hidrelétrica.

Hidrelétricas	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
<i>Batalha</i>	2±1	25±3	22±2	6,3±1,1	188±70	6,9±0,7	0,004±0,001
<i>Belo Monte</i>	5±5	30±2	29±1	7,6±0,7	211±56	6,6±1,8	0,014±0,002
<i>Santo Antônio</i>	4±3	30±2	28±1	7,2±1,1	122±60	5,8±2,3	0,052±0,027
<i>Balbina</i>	18±9	30±2	30±1	7,2±0,5	216±70	6,1±1,0	0,006±0,001
<i>Funil</i>	20±11	24±3	22±2	7,7±0,6	138±49	7,7±2,4	0,046±0,004
<i>Itaipu</i>	16±20	29±3	26±3	8,4±0,5	158±46	7,5±1,4	0,038±0,008
<i>Segredo</i>	27±12	24±3	22±4	8,6±0,7	178±32	6,8±1,3	0,026±0,004
<i>Serra da Mesa</i>	47±32	29±3	27±1	8,2±0,6	108±25	7,1±0,8	0,059±0,005
<i>Três Marias</i>	20±12	27±2	26±1	7,8±0,7	113±38	6,4±1,5	0,038±0,004
<i>Tucuruí</i>	24±15	32±2	30±1	7,6±0,5	131±40	6,9±1,1	0,030±0,004
<i>Xingó</i>	21±23	31±2	27±1	8,8±0,3	129±40	7,7±1,2	0,047±0,002

A média de fluxo difusivo de todos os reservatórios foi correlacionada com a média de cada um dos parâmetros. Esta análise mostrou que apenas a profundidade foi relevante estatisticamente na correlação com os fluxos ($r = -0,78$, $p = 0,00$).

A partir das medidas pontuais obtidas em cada reservatório, realizou-se o Teste de Correlação do fluxo de metano com os parâmetros ambientais. As tabelas completas são apresentadas no Apêndice B. Considerando o $p \leq 0,05$, não foi observada correlação acima de 0,5 revelando que com essa avaliação não se obteve a relevância de nenhum parâmetro no fluxo difusivo de metano.

Os dados também foram analisados através de Análise de Componentes Principais (ACP), para reduzir o número de variáveis e identificar correlações

ou covariância entre elas. Em todos os casos foram necessárias de 2 a 3 componentes principais para determinar a informação estatisticamente significativa. Cada componente está associado a um autovalor que é calculado pela soma dos quadrados dos carregamentos (“loadings”) de cada variável para a variável latente representada pelo fator obtido. Para cada variável que compõe a componente principal é atribuído um peso que se refere ao valor do coeficiente de correlação entre a variável e o fator obtido (FIELD, 2012). As tabelas completas são apresentadas no Apêndice B. Para um $p < 0,05$ nenhuma das componentes principais resultou em correlações altas ($r > 0,5$) evidenciando que nenhum grupo de parâmetros explica a variação do fluxo obtida nos reservatórios.

Comparando os resultados entre as médias, Teste de Correlação e Análise de Componentes Principais foi observado que o fluxo difusivo de metano nos reservatórios teve correlação de fraca a moderada com as características físico-químicas, não havendo predominância de nenhum parâmetro.

5.3 Metano dissolvido

O metano dissolvido na água próximo à superfície pode ser proveniente da produção que ocorre no substrato que é transportado por difusão através da coluna d’água ou por processo de troca gasosa com a atmosfera quando a concentração do metano no ar é maior do que na água. A utilização de câmaras estáticas para determinação de fluxo pode servir para indicar o valor e sentido da troca gasosa considerando se há aumento ou diminuição da razão de mistura do metano no interior da câmara, correspondendo à emissão ou consumo, respectivamente.

Uma primeira abordagem para a estimativa do fluxo através de metano dissolvido foi feita através da correlação direta (regressão linear) por ser a mais simples parametrização entre os dois valores. Foi observado que em todos os reservatórios o fluxo de metano determinado através de câmara estática ocorreu sempre da água para o ar, não havendo casos de consumo. A Figura 5.3 apresenta a relação entre a média de fluxo difusivo dos reservatórios com a

média da concentração de metano dissolvido coletado próximo à superfície da água.

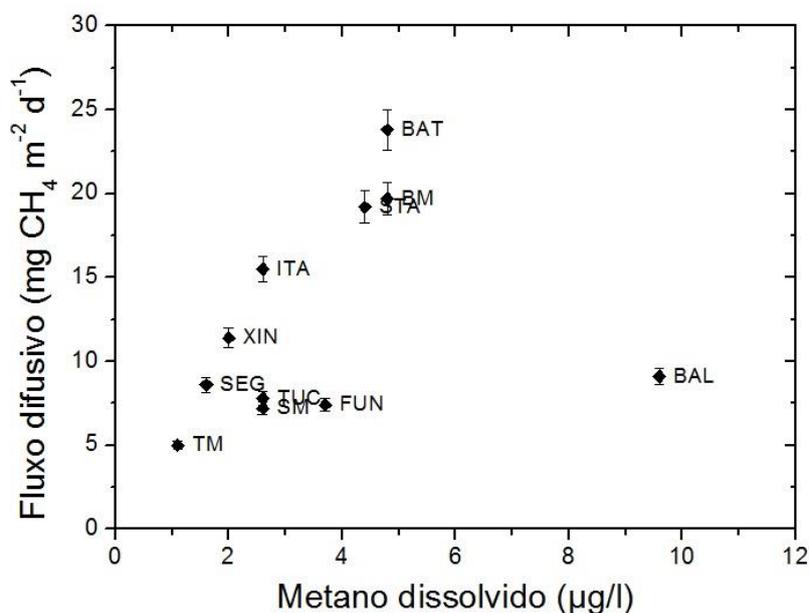


Figura 5.3: Média de fluxo difusivo em função da média de metano dissolvido na água próximo à superfície de todos os reservatórios.

Não houve correlação com significância estatística entre as médias de fluxo e metano dissolvido ($r = 0,28$; $p = 0,40$). Entretanto, observando a figura 26 é possível notar que, com exceção de Balbina que aparece deslocada, os demais reservatórios parecem apresentar crescimento linear do fluxo difusivo quando há aumento da concentração de metano dissolvido. A correlação foi refeita sem os dados de Balbina e o resultado mostrou aumento do coeficiente de correlação ($r = 0,80$) com significância estatística ($p = 0,00$). Não foi possível determinar qual a razão para o reservatório de Balbina apresentar um valor relativamente mais alto de metano dissolvido quando comparado com os demais reservatórios.

Foi realizada então a análise para todos os pontos em cada reservatório. Nas primeiras campanhas a concentração de metano dissolvido em cada ponto era determinada por apenas uma amostra de água que era utilizada apenas para referência, pois o foco inicial era estimar o fluxo. Após a definição dos objetivos deste estudo foram adquiridos novos frascos de amostragem que permitiam a

coleta de cinco amostras em cada ponto. Assim, a concentração de metano dissolvido passou a ser determinado pela média das quintuplicatas a partir da primeira campanha de Xingó em abril de 2012.

Para avaliar a aplicação da metodologia, foi analisada em cada reservatório a relação do fluxo difusivo o metano dissolvido obtido através de uma amostra de água e pela média de quintuplicatas (Figura 5.4). Devido à logística, os primeiros reservatórios estudados, Santo Antônio e Três Marias, tiveram todas as campanhas realizadas com a metodologia de coletar uma amostra de água por ponto. Em contrapartida, as campanhas nos reservatórios de Belo Monte, Balbina, Itaipu, Segredo e Xingó, realizadas no segundo ano do projeto, tiveram o metano dissolvido na maioria dos pontos determinado por cinco amostras. Os resultados das correlações são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Coeficiente de determinação (R^2), probabilidade de significância (p) e número de casos (n) entre fluxo difusivo e metano dissolvido obtido para uma e cinco amostras de água. Em destaque, os valores que apresentaram significância ($p \leq 0,05$).

	1 Amostra			5 Amostras		
	R^2	p	n	R^2	p	n
Batalha	0,00	0,94	22	0,08	0,71	4
Belo Monte	0,02	0,69	9	0,22	0,02	23
Santo Antônio	0,12	0,08	26	-	-	-
Balbina	0,23	0,28	7	0,45	0,02	11
Funil	0,07	0,21	23	0,88	0,00	24
Itaipu	0,12	0,19	15	0,59	0,00	25
Segredo	0,11	0,47	7	0,66	0,00	15
Serra da Mesa	0,01	0,72	22	0,56	0,25	4
Três Marias	0,17	0,02	31	-	-	-
Tucuruí	0,01	0,68	19	0,50	0,07	7
Xingó	0,71	0,00	10	0,40	0,00	24

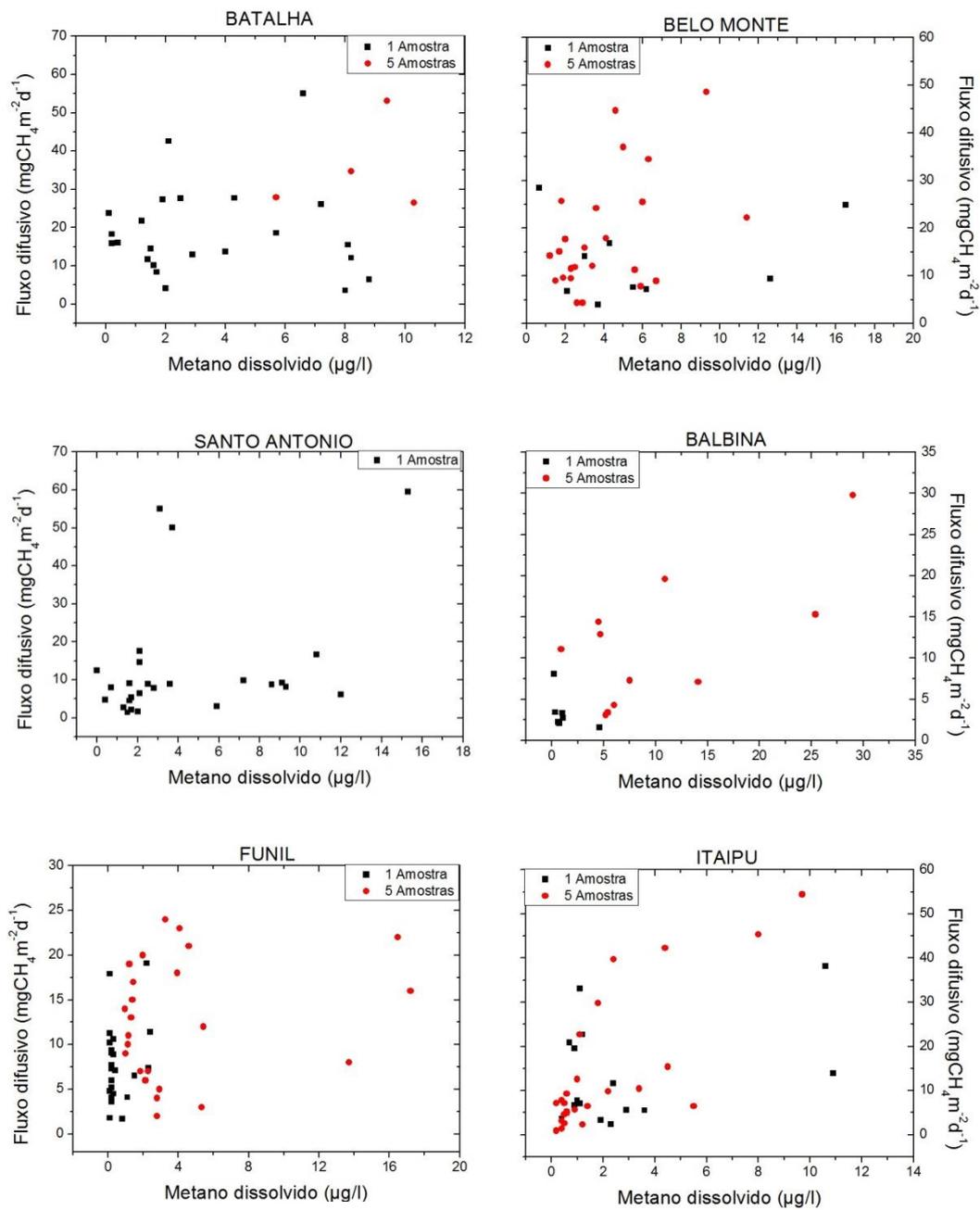


Figura 5.4.A: Fluxo difusivo em função da concentração de metano dissolvido obtido por uma amostra de água (pontos pretos) e pela média de cinco amostras (pontos vermelhos) para todos os reservatórios.

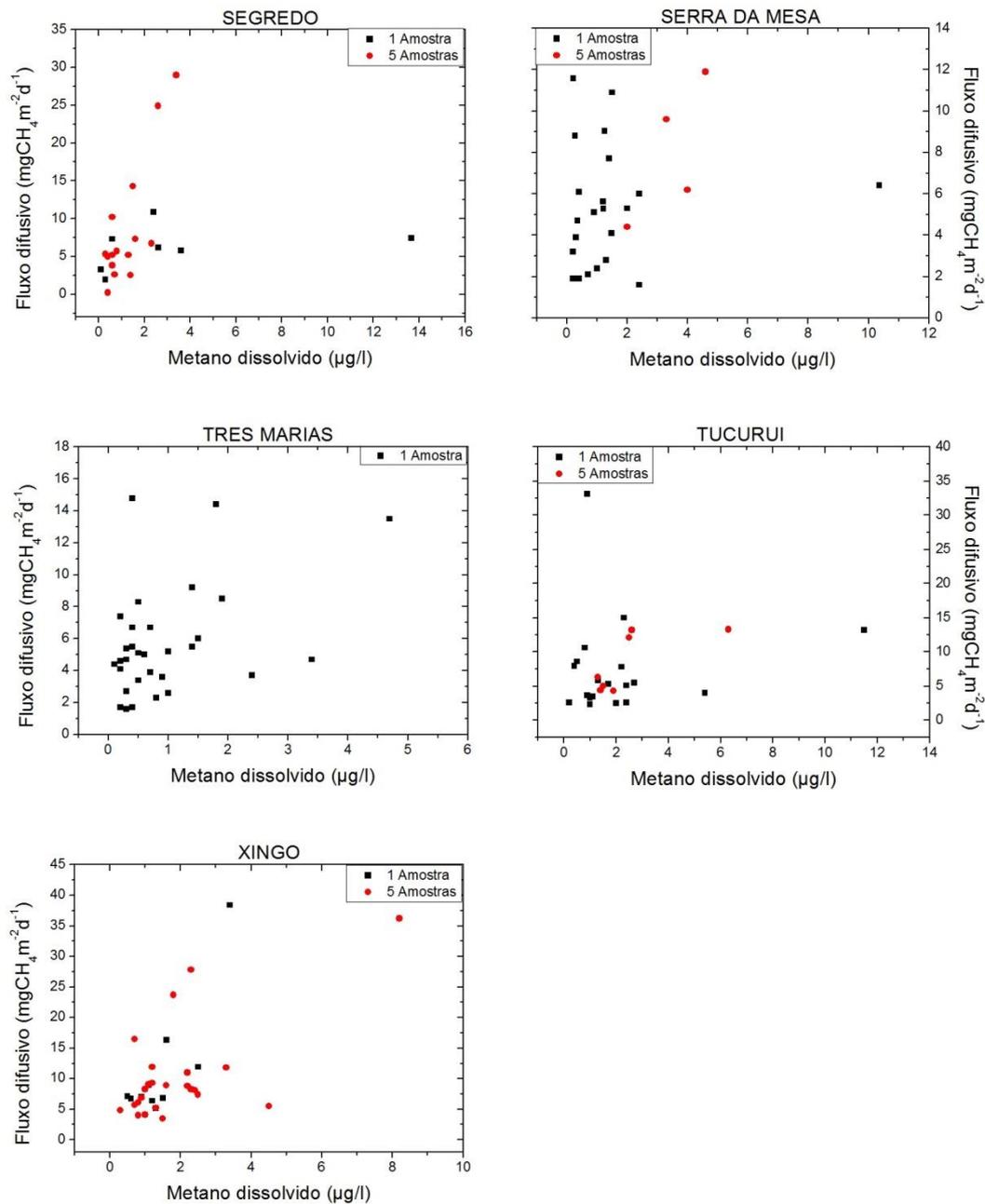


Figura 5.4.B: Fluxo difusivo em função da concentração de metano dissolvido obtido por uma amostra de água (pontos pretos) e pela média de cinco amostras (pontos vermelhos) para todos os reservatórios (Continuação).

O fluxo teve correlação estatística significativa com o metano dissolvido determinado através de uma amostra de água em apenas duas hidrelétricas (Três Marias e Xingó). Com a utilização de quintuplicatas, seis reservatórios (Belo Monte, Balbina, Funil, Itaipu, Segredo e Xingó) passaram a ter correlação do fluxo com o metano dissolvido. Em Batalha, Serra da Mesa e Tucuruí houve poucos casos de MD com cinco amostras.

A comparação entre a média de fluxo difusivo e a média de metano dissolvido, mas desta vez foram considerados apenas os valores associados com quintuplicatas (Figura 5.5). Santo Antônio e Três Marias não foram incluídos devido ao fato de que todos os valores de metano dissolvido foram determinados com apenas uma amostra de água.

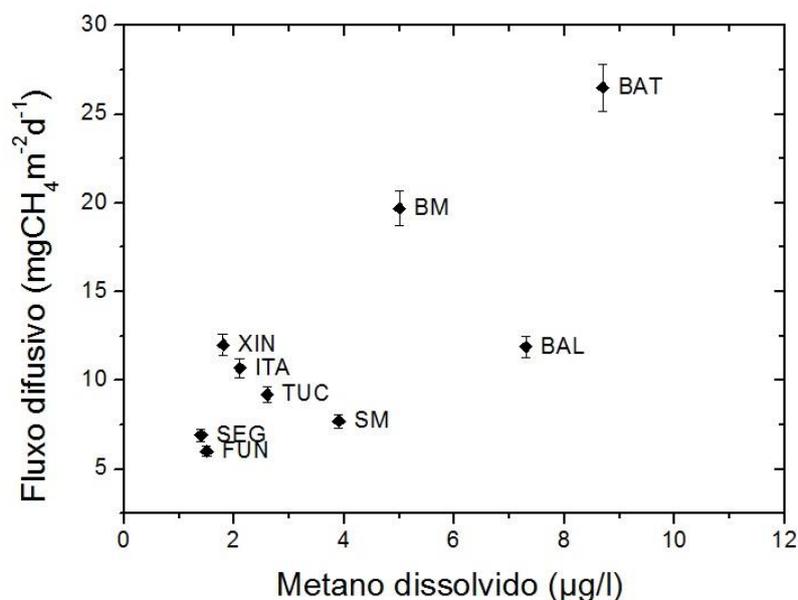


Figura 5.5: Média de fluxo difusivo em função da média de metano dissolvido na água obtido por quintuplicatas.

Houve alta correlação entre as médias ($r = 0,78$; $p = 0,01$) comprovando que a diferença de comportamento de Balbina em relação aos demais reservatórios observado na Figura 5.3 estava associada a problemas na utilização de valores de metano dissolvido obtidos com apenas 1 amostra de água. Devido a estas incertezas optou-se por restringir o estudo da constante de troca gasosa (k) apenas em pontos onde o valor de metano dissolvido pôde ser obtido pela média das quintuplicatas.

5.4 Determinação da constante de troca gasosa (k)

A relação entre a concentração de metano dissolvido subsuperficialmente e o fluxo emitido pode ser dimensionada através da velocidade de troca gasosa na interface água-atmosfera. A constante k pode ser determinada de forma empírica através da Equação 3.8 baseada na Teoria de Filme Estagnado

sugerida por Lewis e Whitman (1924), conforme discutido no capítulo 3.6 deste trabalho. Isolando k a Equação 5.1 pode ser reescrita como:

$$k = \frac{F}{(C_w - C_a)} \quad (5.1)$$

Para fins de cálculo o fluxo (F) foi convertido em $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ e a concentração de metano na água (C_w) e no ar (C_a) em $mol\ m^{-3}$ resultando k em $m\ s^{-1}$. Entretanto, optou-se por apresentar os valores em $mg\ m^{-2}\ d^{-1}$, $\mu g\ l^{-1}$ e $cm\ h^{-1}$, respectivamente, por serem usuais em diversos trabalhos sobre emissão de metano e para evitar a utilização de números exponenciais.

A constante foi calculada em todos os pontos de amostragem onde havia fluxo e metano dissolvido determinado a partir das quintuplicatas. As tabelas com todos os valores de k obtidos encontram-se no Apêndice C devido à grande quantidade de dados gerados. Foi observada a ocorrência de constantes negativas em vários pontos e em quase todos os reservatórios. Por convenção, isto significaria que a troca gasosa estaria ocorrendo da atmosfera para a água, o que seria uma incoerência, pois o fluxo medido através da câmara estática em todos os pontos foi positivo, ou seja, houve emissão de metano dissolvido na água para o ar.

Os valores negativos da constante foram resultados do cálculo ($C_w - C_a$) pois o metano dissolvido no ar e na água encontra-se em momentos físico-químicos diferentes. Para assumir equivalência de potencial químico através da interface ar-água foi necessário fazer a correção da solubilidade do gás nos dois ambientes. Para isto utilizou-se o coeficiente adimensional de solubilidade de Ostwald (α) que é definido como o volume do gás que se dissolve em uma unidade de volume do líquido a uma dada temperatura.

Desta forma, a Equação 5.1 pode ser reescrita como:

$$k = \frac{F}{(C_w - \alpha C_a)} \quad (5.2)$$

O coeficiente de Ostwald pode ser determinado matematicamente através da relação com o coeficiente de absorção de Bunsen (β) e a temperatura (em Kelvin) (WANNINKHOF, 1992):

$$\alpha = \frac{\beta}{T} \quad (5.3)$$

O coeficiente de Bunsen é definido como o volume de gás reduzido a 273 K e a pressão de 1 atm que se dissolve em uma unidade de volume do líquido a uma dada temperatura quando a pressão parcial do gás for de 1 atmosfera. A expressão em função da temperatura e da salinidade conforme descrita por Weiss (1970; 1971) é:

$$\ln \beta = [A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100)] + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (5.4)$$

Onde A e B são constantes, T é a temperatura em Kelvin e S é a salinidade em partes por mil. As constantes para metano dissolvido em água foram retiradas do trabalho de Wiesenburg e Guinasso Jr. (1979). O segundo termo da Equação 5.4 foi desconsiderado por tender a zero devido à baixa salinidade nos reservatórios. Desta forma, temos:

$$\ln \beta = -68,8862 + 101,4956(100/T) + 28,7314 \ln(T/100) \quad (5.5)$$

A correção do metano dissolvido no ar ambiente baseada nos coeficientes de Ostwald e Bunsen foi aplicada na Equação 5.2 gerando novos valores de constante de troca gasosa que são apresentados nas tabelas C.1 a C.8 do Apêndice C. Aplicando a correção do ar ambiente, os valores negativos de k , encontrados em alguns pontos foram corrigidos, tornando-se positivos e, portanto consistentes com o fato de haver emissão de metano nestes pontos. Foi observado também que a faixa de variação das constantes considerando todos os pontos dos reservatórios era maior com os dados originais (-932 a 2936 cm h^{-1}) do que com os dados que sofreram a correção (2 a 117 cm h^{-1}).

Utilizando as constantes corrigidas foi possível estimar a média da velocidade de troca gasosa em cada reservatório (Tabela 5.3). Para isto foram utilizados

os valores de k calculados para todos os pontos e em todas as campanhas. A média de cada ponto é apresentada na Tabela C.9 no Apêndice C.

Tabela 5.3 – Média da constante de troca gasosa corrigida (k) e média da velocidade do vento nos reservatórios considerando os pontos em todas as campanhas.

Hidrelétricas	k (cm h ⁻¹)	Vento (m s ⁻¹)
Belo Monte	19	1,4
Balbina	13	0,6
Itaipu	30	3,4
Segredo	24	2,4
Serra da Mesa	9	0,5
Tucuruí	17	6,2
Xingó	37	4,0

As menores médias foram observadas em Balbina (13 cm h⁻¹) e Serra da Mesa (9 cm h⁻¹) que tiveram médias de velocidade de vento de 0,6 e 0,5 m s⁻¹, respectivamente, enquanto que as maiores ocorreram em Itaipu (30 cmh⁻¹) e Xingó (37 cm h⁻¹) com médias de velocidade de vento mais elevadas (3,4 e 4,0 m s⁻¹, respectivamente). A diferença da velocidade de troca gasosa nos reservatórios pode estar associada a mecanismos que favoreçam a emissão do metano dissolvido na água para a atmosfera. Diversos estudos apontam que o vento é um dos principais fatores que influenciam a troca gasosa por alterar a rugosidade da superfície da água que resultaria no aumento do escape do metano para a atmosfera (LISS, 1973; DEACON, 1976; WANNINKHOF, 1992; WANNINKHOF *et al.*, 2009).

5.5 Avaliação da influência da velocidade do vento na constante de troca gasosa (k)

A verificação da influência do vento na emissão de metano nos reservatórios de hidrelétricas foi feita apenas em pontos que reuniam todos os dados necessários: fluxo; metano dissolvido com quintuplicatas; temperatura da água (para correção do ar ambiente) e velocidade do vento. Os reservatórios de Batalha, Serra da Mesa e Tucuruí foram descartados por terem uma quantidade pequena de dados (apenas 3-4), enquanto que em Funil não foi

medida a velocidade do vento em nenhum ponto, o que não permitiu a inclusão destes reservatórios nesta análise. A relação de k com a velocidade do vento foi então feita em Belo Monte, Balbina, Itaipu, Segredo e Xingó.

A velocidade do vento (U_z) foi medida em cada ponto com o auxílio de um anemômetro portátil a uma altura (z) de 1,5 metros da superfície da água. De modo a evitar a influência da topografia, a velocidade do vento foi normalizada para 10 metros (U_{10} , em $m\ s^{-1}$), utilizando a equação proposta por Amorocho e DeVries (1980):

$$U_z = U_{10} [1 - C_{10}^{1/2} \kappa^{-1} \ln(10/z)] \quad (5.6)$$

Onde C_{10} é o coeficiente de arraste na superfície para ventos a 10 m ($1,3 \times 10^{-3}$) e κ é a constante de von Karman (0,41).

Organizando a Equação 5.6 temos:

$$U_{10} = \frac{U_{1,5}}{[1 - (1,3 \times 10^{-3})^{1/2} (0,41)^{-1} \ln(10/1,5)]} \quad (5.7)$$

A Figura 5.6 apresenta a dispersão das constantes de troca gasosa (k) e a velocidade do vento normalizada para 10 metros (U_{10}) para todos os dados sem fazer diferenciação por campanhas ou reservatórios.

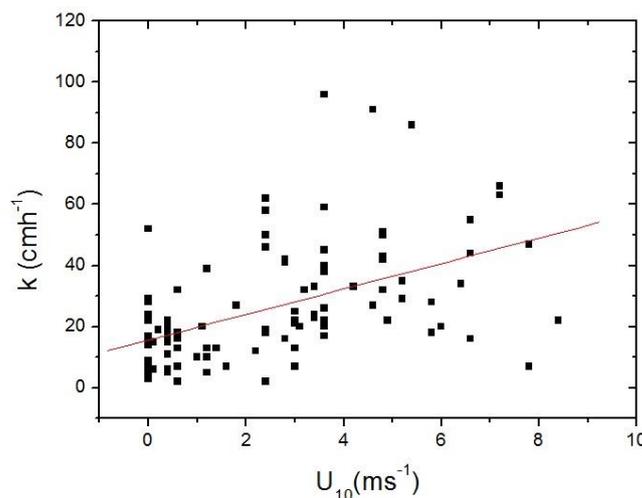


Figura 5.6: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada para 10 metros (U_{10}) em todos os reservatórios.

O coeficiente de correlação foi de 0,49 com significância estatística ($p = 0,00$). Porém, trabalhos realizados em túneis de vento mostraram que o fluxo de metano exibe características logarítmicas para ventos superiores a 4 ms^{-1} (SEBACHER *et al.*, 1983; LISS, 1973). Para verificar este fato as constantes foram então separadas em dois grupos em função da velocidade do vento normalizada (Figura 5.7).

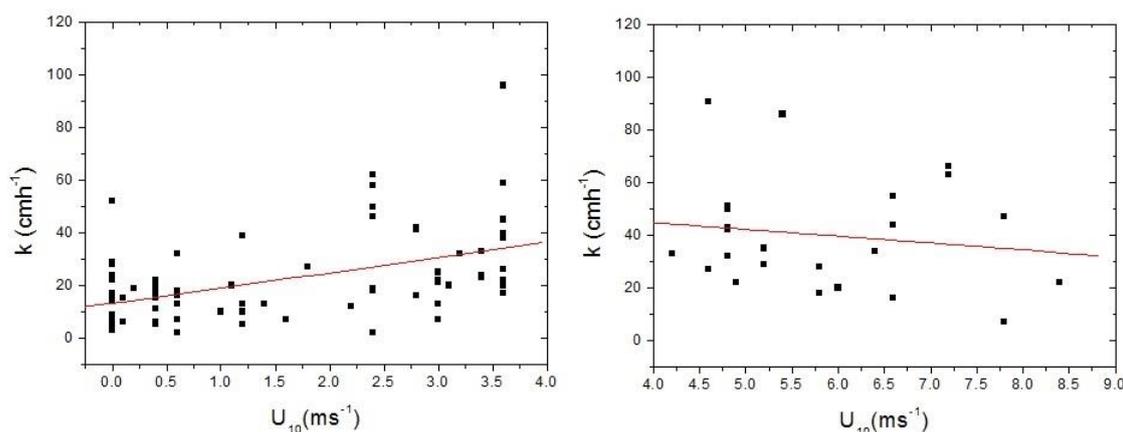


Figura 5.7: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) menor que 4 ms^{-1} (esquerda) e para U_{10} maior ou igual a 4 ms^{-1} (direita) utilizando todos os pontos dos reservatórios.

Os pontos com U_{10} menor que 4 m s^{-1} tiveram praticamente a mesma correlação com significância estatística ($r = 0,47$; $p = 0,00$), entretanto, em locais onde o vento normalizado foi igual ou superior a 4 m s^{-1} não houve correlação estatística significativa ($r = -0,15$; $p = 0,49$). Segundo Deacon (1977) altas velocidades de vento provocam ondulações na água que afetam a rugosidade da superfície. Este fato pode em um primeiro momento provocar a rápida liberação do metano para a atmosfera, mas posteriormente causa um “esgotamento” momentâneo do gás acumulado próximo à superfície.

A análise foi feita individualmente para os reservatórios englobando os dados de todas as campanhas. Em Belo Monte houve apenas dois pontos que tiveram U_{10} maior que 4 m s^{-1} . A correlação incluindo esses dois pontos foi de 0,67 (Figura 5.8), havendo pouca diferença da correlação apenas para pontos com U_{10} menor que 4 m s^{-1} ($r = 0,68$), sendo que em ambos os casos foram estatisticamente significantes ($p = 0,00$).

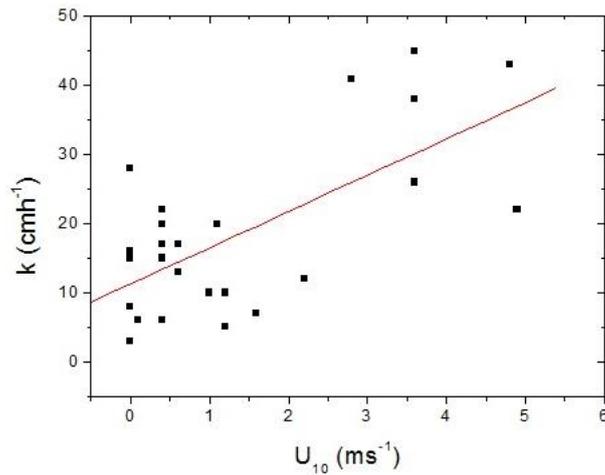


Figura 5.8: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) em Belo Monte.

Em Balbina, a velocidade do vento normalizado na maioria dos pontos foi inferior a 1 m s^{-1} e não houve casos acima de 4 m s^{-1} (Figura 5.9). A correlação não foi significativa ($r = 0,44$; $p = 0,18$), isto sugere que a troca gasosa de metano na interface ar-água em Balbina é pouco influenciada pela ação do vento ou que não houve amostras suficientes para uma melhor avaliação da relação.

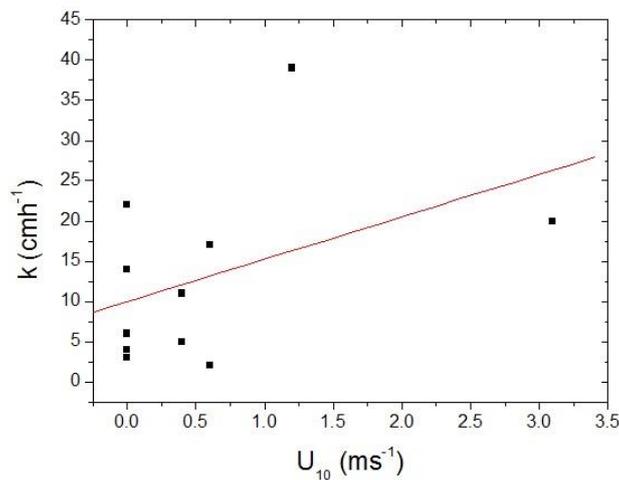


Figura 5.9: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) em Balbina.

Os reservatórios de Itaipu, Segredo e Xingó tiveram em comum uma quantidade significativa de pontos que permitiram a análise para o grupo de

constantes com U_{10} menor que 4 m s^{-1} e para o grupo onde o vento normalizado foi maior ou igual a 4 m s^{-1} (Figura 5.10).

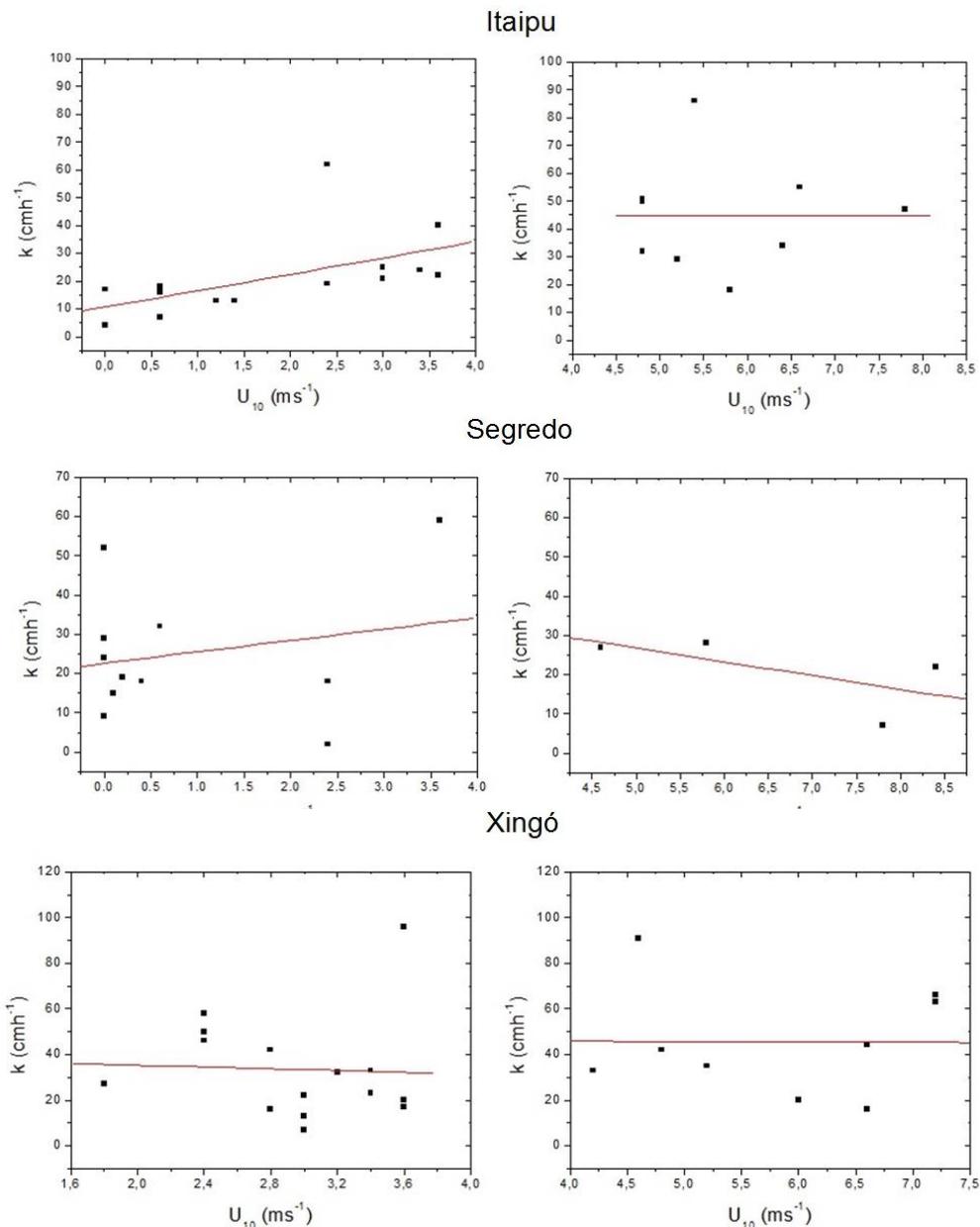


Figura 5.10: Constante de troca gasosa (k) em função da velocidade do vento normalizada (U_{10}) menor que 4 m s^{-1} (esquerda) e maior ou igual a 4 m s^{-1} (direita) em Itaipu (acima), Segredo (meio) e Xingó (abaixo).

A correlação foi significativa em Itaipu para o primeiro grupo ($r = 0,55$; $p = 0,04$), mas não houve correlação entre k e U_{10} acima de 4 m s^{-1} . Em Segredo a correlação não teve significância estatística para velocidades de vento menores que 4 m s^{-1} ($r = 0,21$; $p = 0,52$) ou acima de 4 m s^{-1} ($r = -0,63$; $p = 0,36$). Os pontos em Xingó estavam bem distribuídos em relação à

velocidade de vento, porém assim como em Segredo não houve correlação estatística significativa para U_{10} menor que 4 m s^{-1} ($r = -0,05$; $p = 0,87$) e para U_{10} maior que 4 m s^{-1} ($r = -0,01$; $p = 0,98$).

Desta forma, em Segredo e Xingó não foi possível realizar a extrapolação mesmo para o conjunto de dados onde as velocidades de vento foram inferiores a 4 m s^{-1} . A dispersão dos dados pode ser resultado de problemas na coleta ou outros fatores não levados em consideração que podem estar influenciando a constante de troca gasosa.

5.6 Estimativa de fluxo em função de metano dissolvido e vento

A partir da determinação da constante de troca gasosa nos reservatórios de Belo Monte e Itaipu foi observado que a velocidade do vento é o principal fator relacionado à emissão de metano da água para a atmosfera. A relação entre k e U_{10} é constante para o reservatório mesmo considerando que os valores da constante tiveram diferença entre os pontos, que se encontravam dispersos por toda a área do reservatório, e mesmo com coletas em diferentes épocas do ano. Assim, é possível obter o k para pontos onde se tenha medidas de vento. Sabendo a velocidade em que a troca gasosa ocorre na interface ar-água e com as medidas de metano dissolvido no ponto pode-se então estimar o fluxo de metano. Os reservatórios de Balbina, Segredo e Xingó foram descartados pois a relação entre k e U_{10} não foi constante o que impossibilita obter o valor da constante de troca gasosa através da medição do vento.

A relação entre k e U_{10} foi refeita em Belo Monte e Itaipu utilizando aproximadamente 70% dos pontos para gerar a equação polinomial de cada reservatório. Através da equação é possível estimar o valor da constante apenas com base na velocidade do vento e da média do metano dissolvido medidos em cada ponto. A escolha da função polinomial foi baseada nos trabalhos de Liss (1973) e Sebacher *et al.* (1983) que mostraram que a velocidade de emissão do metano em ambientes controlados tem pouca variação para baixas velocidades de vento mas assume caráter exponencial para ventos acima de aproximadamente $1,5 \text{ ms}^{-1}$.

Em Belo Monte houve um total de vinte e três pontos onde se determinou a constante de troca gasosa e se mediu a velocidade do vento. Para determinar a equação da curva foram utilizados dezesseis pontos. Com estes 16 conjuntos de dados, foi obtida uma correlação estatística significativa ($r = 0,52$; $p = 0,01$) apresentada na Figura 5.11. Os sete conjuntos restantes foram selecionados de forma aleatória e removidos da parametrização polinomial e foram utilizados posteriormente na validação.

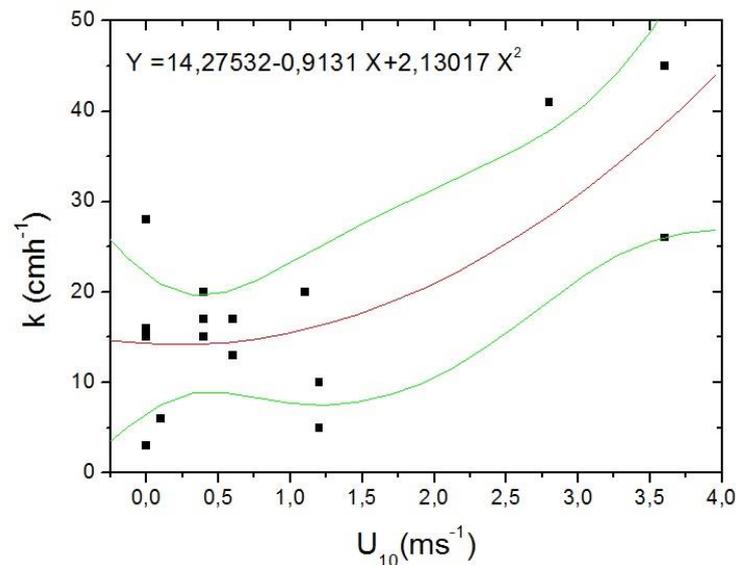


Figura 5.11: A linha vermelha representa a relação entre a constante de troca gasosa e velocidade do vento corrigida nos pontos selecionados para gerar a equação da curva do reservatório de Belo Monte. As linhas verdes representam o nível de confiança de 95%.

Deste grupo de 16 conjuntos de dados, a constante de troca gasosa k , para Belo Monte, pode ser obtida da seguinte equação:

$$k_{Estimado} = 2,1(U_{10})^2 - 0,9(U_{10}) + 14,3 \quad (5.8)$$

A mesma metodologia foi empregada em Itaipu, sendo que dos treze conjuntos de dados completos disponíveis, nove foram utilizados para obter a equação e quatro foram retirados aleatoriamente para validação. A Figura 5.12 apresenta a relação entre k e U_{10} ($r = 0,67$; $p = 0,03$) e a equação gerada para Itaipu.

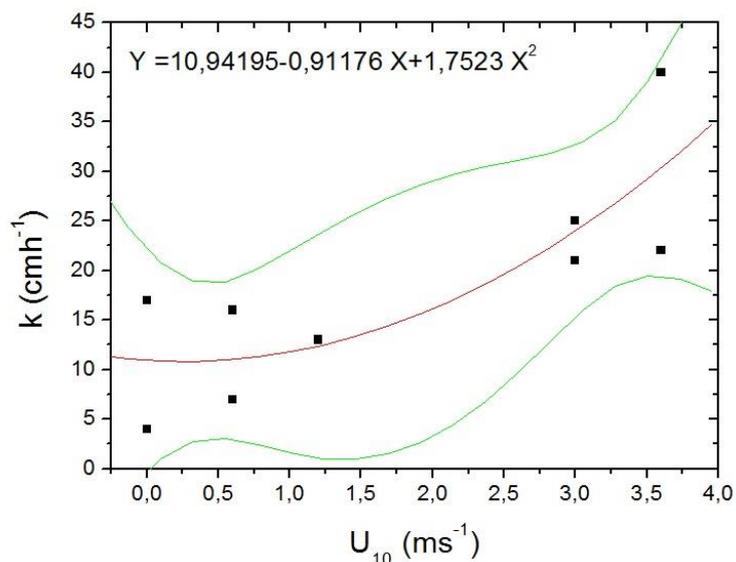


Figura 5.12: A linha vermelha representa a relação entre a constante de troca gasosa e velocidade do vento corrigida nos pontos selecionados para gerar a equação da curva do reservatório de Itaipu. As linhas verdes representam o nível de confiança de 95%.

Reescrevendo a equação para estimar k em função da velocidade de vento corrigido em Itaipu, temos:

$$k_{Estimado} = 1,8(U_{10})^2 - 0,9(U_{10}) + 10,9 \quad (5.9)$$

Depois de obtidas as Equações 5.8 e 5.9, foram estimados os valores de k para os conjuntos reservados para validação. O k estimado para cada conjunto é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores da constante de troca gasosa (k) estimada através da equação do reservatório em função da velocidade de vento corrigida (U_{10}).

	U_{10} (m s ⁻¹)	k Estimado (cm h ⁻¹)
Belo Monte	1,6	18
	3,6	39
	0,0	14
	1,0	15
	0,4	14
	2,2	23
	0,4	14
Itaipu	1,4	13
	3,4	28
	2,4	19
	0,6	11

Conhecido o k , o fluxo de metano pode ser estimado a partir da diferença de metano dissolvido na interface água-atmosfera medidos em cada ponto e corrigidos pelo coeficiente de Ostwald (α). Reescrevendo a Equação 5.2, temos o fluxo estimado sendo dado por:

$$F = k(C_w - \alpha C_a) \quad (5.10)$$

Da Equação 5.10, foram obtidos os fluxos de metano para os conjuntos de dados reservados para validação (7 para Belo Monte e 4 para Itaipu). Estes fluxos estimados puderam então ser comparados com os fluxos que foram medidos utilizando câmaras estáticas naqueles conjuntos. A comparação entre os fluxos estimados e medidos para Belo Monte e Itaipu é apresentada na Figura 5.13.

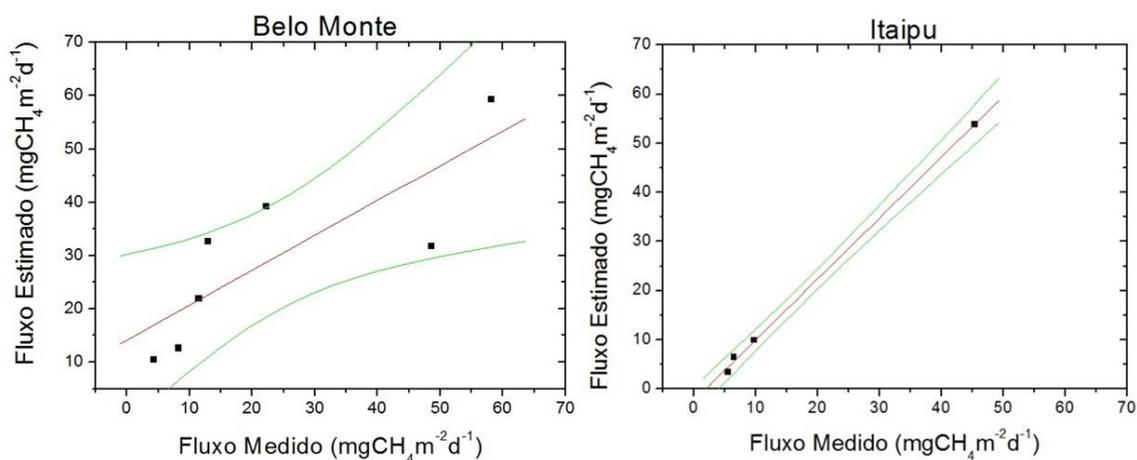


Figura 5.13: A linha vermelha representa a relação entre o fluxo estimado de metano e o fluxo medido através de câmara estática nos reservatórios de Belo Monte (esquerda) e Itaipu (direita). As linhas verdes representam o nível de confiança de 95%.

A correlação obtida entre fluxos medidos e fluxos estimados mostrou boa concordância para Belo Monte ($r = 0,82$; $p = 0,02$) e Itaipu ($r = 0,99$; $p = 0,00$), evidenciando que o fluxo pode ser estimado através da equação específica para cada reservatório. Diversos trabalhos que estudam os mecanismos que influenciam a emissão de gases dissolvidos na água para a atmosfera apontam que a dificuldade encontra-se em quantificar a velocidade do coeficiente de troca gasosa específico para cada ambiente (JÄHNE *et al.*, 1987; CRUSIUS;

WANNINKHOF, 2003; UPSTILL-GODDARD, 2006). Silva (2010) utilizou o modelo sugerido por Lewis e Whitman (1924), descrito no capítulo 3.6 deste trabalho, para estimar o fluxo de metano no Pantanal com condição de praticamente ausência de vento e correnteza e a correlação com o fluxo medido foi baixa ($r = 0,28$).

Comparando-se os valores de fluxo estimados e medidos obteve-se para Belo Monte a média global de 29,7 e 23,7 mg CH₄ m⁻² d⁻¹, respectivamente. Para Itaipu, a média do fluxo estimado foi de 18,4 mg CH₄ m⁻² d⁻¹ e a média do fluxo medido foi de 16,8 mg CH₄ m⁻² d⁻¹. Embora as correlações entre fluxo estimado e medido apresentaram alta correlação, observou-se que os fluxos estimados através da constante de troca gasosa k superestimaram os valores comparados aos fluxos medidos (25% para Belo Monte, 10% para Itaipu).

Como observado em Belo Monte e Itaipu, nos reservatórios onde a relação da constante de troca gasosa com a velocidade do vento pôde ser extrapolada para todo o reservatório, o fluxo pode ser estimado através de medidas indiretas. A vantagem da utilização deste método está associada com a redução do tempo em cada ponto de amostragem, tendo em vista que a coleta de amostras de água e ar para metano dissolvido são muito mais rápidas do que a coleta de amostras de ar com a utilização de câmaras estáticas para determinação de fluxo de metano, permitindo um aumento do número de pontos amostrais em cada campanha. Este método também pode ser aplicado para estimar fluxo de metano em pontos onde a utilização de câmaras estáticas não é viável em decorrência de agitação na superfície da água que muitas vezes causa o tombamento da câmara. A desvantagem do método está associada com a sua imprecisão para velocidades de ventos acima de 4 ms⁻¹ que necessitariam um aprofundamento do estudo considerando outras variáveis como, por exemplo, a medição da altura das ondas formadas no reservatório em decorrência da agitação causada pelo vento (WU, 1968).

Ressalta-se o fato de que a metodologia desenvolvida neste trabalho para estimar fluxo não pôde ser aplicada à todos os reservatórios devido às restrições na qualificação dos dados que levaram a restar somente dois

reservatórios (Belo Monte e Itaipu) para o estudo final. Em Xingó e Segredo a correlação da constante de troca gasosa com o vento não pôde ser extrapolada para todo o reservatório. Nos demais reservatórios seria necessária a realização de novas campanhas com o objetivo de coletar todos os parâmetros necessários para a aplicação do modelo de forma a determinar se é possível obter a equação específica destes reservatórios.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo definir os parâmetros físico-químicos necessários para realizar a parametrização do fluxo difusivo de metano em reservatórios de usinas hidrelétricas.

Nos 11 reservatórios estudados foi observada a dominância de fluxos difusivos, com a ocorrência de 989 medidas e valor médio de $12,4 \pm 16,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Os casos de fluxos ebulitivos ($n = 88$), mesmo apresentando valores médios maiores ($888,6 \pm 1872,8 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) representaram menos de 9% das medidas realizadas.

Os resultados da comparação entre as médias, Teste de Correlação e Análise de Componentes Principais evidenciaram que o fluxo difusivo de metano nos reservatórios teve correlação de fraca a moderada com os parâmetros ambientais medidos, não havendo predominância de nenhum parâmetro.

A constante de troca gasosa (k) foi determinada para os pontos onde havia dados de fluxo de metano medido, concentração de metano dissolvido na água e no ar e temperatura da água. Em reservatórios com quantidade significativa de conjuntos de dados pôde ser estudada a relação de k com a velocidade do vento. A determinação desta relação foi possível para os reservatórios de Belo Monte e Itaipu. Com base na relação foram realizadas estimativas de fluxo de metano nestes dois reservatórios. A comparação com fluxos medidos apresentou alta correlação (Belo Monte: $r = 0,82$; $p = 0,02$; Itaipu: $r = 0,99$; $p = 0,00$).

Este trabalho mostrou que, a partir de um determinado conjunto de variáveis: fluxo difusivo medido, velocidade do vento, concentração de metano dissolvido na água e no ar, temperatura da água, obtidos em cada ponto de coleta, pode-se obter a parametrização do fluxo de metano.

A utilização da parametrização descrita neste trabalho demanda menos tempo para serem realizadas do que o necessário para as realizadas pelo método de câmara estática, e estão menos sujeitas às dificuldades que são encontradas

com as câmaras, como movimentação do barco, transporte de grandes volumes (câmaras e seringas de coleta), que reduzem a quantidade de pontos que podem ser amostrados.

Sugestões de trabalhos futuros

Em reservatórios onde a relação entre a constante de troca gasosa e o vento não pôde ser parametrizada com sucesso, recomenda-se o aumento do número de amostras de forma que a parametrização seja individualizada em diferentes pontos do reservatório.

Em áreas com ocorrência de velocidades de vento elevadas observa-se a tendência de formar ondulações que dificultam a medição com câmaras estáticas, que podem causar grande deriva do barco e provoca a emissão exponencial do metano na superfície, o que invalida a parametrização desenvolvida neste trabalho. Em estudos futuros sugere-se a inclusão da altura da onda nesta parametrização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRIL, G.; GUERIN, F.; RICHARD, S.; DELMAS, R.; GALY-LACAUX, C.; GOSSE, P.; TREMBLAY, A.; VARFALVY, L.; DOS SANTOS, M.A.; MATVIENKO, B. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). **Global Biogeochem Cycles**, 19:GB4007. Doi: 10.1029/2005 GB002457, 2005.
- ABRIL, G.; RICHARD, S.; GUERIN, F. In situ measurements of dissolved gases (CO₂ and CH₄) in a wide range of concentrations in a tropical reservoir using an equilibrador. **Science of the Total Environment**, v. 354, p. 246-251, 2006.
- AGOSTINETTO, D. FLECK, N.G.; RIZZARDI, M.A.; BALBINOT JR, A.A., Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 32, n. 6, p. 1073-1081, 2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**, 2ª ed. Brasília-Brasil, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Projeto BALCAR – Emissões de gases do efeito estufa em reservatórios de centrais hidrelétricas**. Brasília: Brasil, Ministério de Minas e Energia, Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ, p. 418, 2014.
- ALVALÁ, P.C. **Observações do metano atmosférico no Brasil**. 1995. 126 p. (INPE-5969-TDI/573). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1995.
- AMOROCHO, J.; DeVRIES, J.J. A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, p. 433-442, 1980.
- ATKINSON, L.P.; RICHARDS, F.A. The occurrence and distribution of methane in the marine environment. **Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts**, v. 14, n. 6, p. 673-684, 1967.
- BAIRD, C. **Química Ambiental**, 2 ed., Porto Alegre: Bookman, 2002.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEM). **Relatório síntese – ano base 2013**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2014.
Disponível em:
https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese%20do%20Relatório%20Final_2014_Web.pdf
Acesso em: Julho de 2014.

BAMBACE, L.A.W.; RAMOS, F.M.; LIMA, I.B.T.; ROSA, R.R. Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams. **Energy**, v. 32, p. 1038-1046, 2007.

BARROS, N.; COLE, J.J.; TRANVIK, L.J.; PRAIRIE, Y.T.; BASTVIKEN, D.; HUSZAR, V.L.M.; DEL GIORGIO, P.; ROLAND, F. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. **Nature Geoscience**, v. 4, p. 593-596, 2011.

BARTLETT, K.B.; CRILL, P.M.; SEBACHER, D.I.; HARRIS, R.C.; WILSON, J.O.; MELACK, J.M. Methane flux from the central Amazonian floodplain. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p. 1571-1582, 1988.

BARTLETT, K.B.; CRILL, P.M.; BONASSI, J.A.; RICHEY, J.E.; HARRISS, R.C. Methane flux from the Amazon River floodplain: Emissions during rising water. **J. Geophys. Res.**, v. 95, n. D10, p. 16,773-16,788, 1990.

BASTVIKEN, D.; COLE, J.; PACE, M.; TRANVIK, L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and global estimate. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 18, 2004.

BELGER, L.; FORSBERG, B.R.; MELACK, J.M. Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River basin, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, p. 171-183, 2011.

BERNER, U.; POGGENBURG, J.; FABER, E.; QUADFASEL, D.; FRISCHE, A. Methane in ocean waters of the Bay of Bengal: its sources and exchange with the atmosphere. **Deep-Sea Research**, v. 50, p. 925-950, 2003.

BLAKE, D.R.; ROWLAND, F.S. Continuing worldwide increase in tropospheric methane, 1978 to 1987. **Science**, v. 239, p. 1129– 1131, 1988.

BUTENHOFF, C.L.; KHALIL, M.A.K. Global methane emissions from terrestrial plants. **Environ. Sci. Technol.**, v. 41, p. 4032-4037, 2007.

CHANUDET, V.; DESCLOUX, S.; HARBY, A.; SUNDT, H.; HANSEN, B.H.; BRAKSTAD, O.; SERÇA, D.; GUERIN, F. Gross CO₂ and CH₄ from the Nam Ngum and Nam Leuk sub-tropical reservoirs in Lao PDR. **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 5383-5391, 2011.

CICERONE, R.J.; OREMLAND, R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 2, p. 299-327, 1988.

CIOLA, R. **Fundamentos da cromatografia a gás**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1985. 266p.

CONRAD, R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO). **Microbiol. Rev.**, 60, 609–640, 1996.

CONRAD, R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 28, p. 193-202, 1999.

COOPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia). Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros, p. 152-156, in: **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatório de Referência**. Ed. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. p. 114, 2002.

CRILL, P.M.; BARTLETT, K.B.; WILSON, J.O.; SEBACHER, D.I.; HARRISS, R.C.; MELACK, J.M.; MACINTYRE, S.; LESACK, L.; SMITH-MORRILL, L. Tropospheric methane from the Amazonian floodplain lake. **J. Geophys. Res.**, v. 93, n. D2, p. 1564-1570, Feb. 1988.

CRUSIUS, J.; WANNINKHOF, R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. **Limnology and Oceanography**, v. 48, p. 1010-1017, 2003.

DALAL, R.C.; ALLEN, D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. **Australian Journal of Botany**, v. 56, p. 369-407, 2008.

DEACON, E.L. Gas transfer to and across an air-water interface. **Tellus**, v. 29, p. 363-374, 1977.

DEACON, E.L. Sea-air transfer: the wind speed dependence. **Boundary-Layer Meteorol.**, v. 21, p. 31-37, 1981.

DESCLOUX, S.; CHANUDET, V.; POILVÉ, H.; GRÉGOIRE, A. Co-assessment of biomass and soil organic carbon stocks in a future reservoir area located in Southeast Asia. **Environ Monit Assess**, v. 173, p. 723-741, 2011.

DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E.; CLARK, W.A.; KING, S.L.; MARTINELLI, L.A. Methane emissions to the troposphere from the Amazon floodplain. **J. Geophys. Res.**, v. 93, n. D2, p. 1583-1592, 1988.

DICKINSON, R.E.; CICERONE, R.J. Future global warming from atmospheric trace gases. **Nature**, v. 319, p. 109-115, 1986.

DLUGOKENCKY, E.; MASARIE, K.; LANG, P.; TANS, P. Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden. **Nature**, v. 393, p. 447-450, 1998.

DONNER, L.; RAMANATHAN, V. Methane and nitrous oxide: their effects on the terrestrial climate. **J. Atmos. Sci.**, v. 37, p. 119-124, 1980.

EHHALT, D.H.; SCHMIDT, U. Sources and sinks of atmospheric methane. **Pure and Applied Geophys.**, v. 116, n. 2-3, p. 452-464, Feb. 1978.

ERICKSON, D.J. III. Variations in the global air-sea transfer velocity field of CO₂, **Global Biochem. Cycles**, v. 3, p. 37-41, 1989.

ETHERIDGE, D.; STEELE, L.; FRANCEY, R.; LANGENFELDS, R. Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: evidence of anthropogenic emissions and climatic variability. **J. Geophys. Res.** v. 103, p. 15979– 15993, 1998.

FAIRALL, C.W.; HARE, J.E.; EDSON, J.B.; MCGILLIS, W. Parametrization and Micrometeorological measurement of air-sea gas transfer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 96, p. 63-105, 2000.

FEARNSIDE, P.M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of greenhouse gases. **Environ Conserv.**, v. 22, p. 7-19, 1995.

FEARNSIDE, P.M. Hidrelétricas como “fábricas de metano”: o papel dos reservatórios em áreas de floresta tropical na emissão de gás de efeito estufa. **Oecol. Bras.**, v. 12 (1), p. 100-115, 2008.

FEELY, R.A.; GAMMON, R.H.; TAFT, B.A.; PULLEN, P.E.; WATERMAN, L.S.; CONWAY, T.J.; GENDRON, J.F.; WISEGARVER, D.P. Distribution of chemical tracers in the eastern equatorial Pacific during and after the 1982-1983 El Niño/southern oscillation event, **J. Geophys. Res.**, v. 92, p. 6545-6558, 1987.

FERREL, R.T.; HIMMELBLAU, D.M. Diffusion coefficients of nitrogen and oxygen in water. **J. Chem. And Eng. Data**, v. 12, p. 111-115, 1967.

FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS statistics**. 4 ed. [S.l.]: Sage Publications Ltd., 2012.

GALY-LACAUX, C.; DELMAS, R.; JAMBERT, C.; DUMESTRE, J.F.; LABROUE, L.; RICHARD, S.; GOSSE, P. Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 11, n. 4, p. 471-483, 1997.

GHUDE, S.D.; JAIN, S.L.; ARYA, B.C. Temporal evolution of measured climate forcing agents at South Pole, Antarctica. **Current Science**, v. 96, n. 1, p. 49-57, 2009.

GUERIN, F.; ABRIL, G.; RICHARD, S.; BURBAN, B.; REYNOUARD, C.; SEYLER, P.; DELMAS, R. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: significance of downstream rivers. **Geophys Res Lett**, v. 33, n. 21, L21407, 2006. doi: 10.1029/2006GL027929.

HOLMES, M.E.; SANSONE, F.J.; RUST, T.M.; POPP, B.N. Methane production, consumption, and air-sea exchange in the open sea: An evaluation based on carbon isotopic ratios. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, p. 1-10, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Revisiting the use of managed land as a proxy for estimating national anthropogenic emissions and removals**. EGGLESTON H.S.; SRIVASTAVA N.; TANABE K.; BAASANSUREN J. (eds.). Hayama: IGES, Japan, 2010. (Meeting Report, 5-7 May, 2009, INPE, São José dos Campos, Brazil).

IOFFE, B.V.; VITENBERG, A.G. **Head-space analysis and related methods in gas chromatography**. New York: Wiley, 1984. 276 p.

JÄHNE, J.; HAUSECKER, H. Air-water gas exchange. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 30, p. 443-468, 1998.

JUNK, W.J.; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R.E. The Flood Pulse Concept in river. Floodplain systems. **Can. Spec. Publ. Fish. Aquatic. Sci.**, v. 106, p. 110-127, 1989.

KELLER, M.; MITRE, M.E.; STALLARD, R.F. Consumption of atmospheric methane in soils of central Panama: effects of agricultural development. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 4, n. 1, p. 21-27, Mar. 1990.

KELLER, M.; STALLARD, R. F. Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D4, p. 8307-8319, Abr. 1994.

KEPPLER, F.; HAMILTON, J.T.G.; BRAB, M.; RÖCKMANN, T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. **Nature**, v. 439, p. 187-191, 2006.

KHALIL, M.A.K.; RASMUSSEN, R.A. Global emissions of methane during the last several centuries. **Chemosphere**, v. 29, n. 5, p. 833-842, Sept. 1994. Khalil e Rasmussen, 1994.

KHALIL, M.A.K.; RASMUSSEN, R.A.; SHEARER, M.; DALLUGE, R.; REN, L.; DUAN, C.L. Factors affecting methane emissions from rice fields. **J. Geophys. Res.**, v. 103, n. D19, p. 25219-25231, 1998.

LAMBERT, M.; FRÉCHETTE, J. L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. pp. 37-60. In A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneaus [eds]. **Greenhouse gas emissions – fluxes and processes: Hydroelectric reservoirs and natural environments**. Springer. 2005.

LANGMUIR, D. **Aqueous environmental geochemistry**. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1997.

LEWIS, W.; WHITMAN, W. Principles of gas absorption. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 16, n. 12, p1215-1220, 1924.

LIMA, I.B.T. Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydroreservoirs. **Chemosphere**, v. 59, p. 1697-1702, 2005.

LIMA, I.B.T.; RAMOS, F.M.; BAMBACE, L.A.W.; ROSA, R.R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: A developing nation perspective. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 13, p. 193-206, 2008.

LISS, P.S. Processes of gas exchange across an air-water interface. **Deep-Sea Res.**, v. 20, p. 221-238, 1973.

LISS, P.S.; MERLIVAT, L. Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis, **The Role of Air-sea Exchange in Geochemical Cycling**, p. 113-129, 1986.

MARANI, L. **Estudo da emissão de metano no Pantanal Sul Matogrossense**. 2007. 108 p. (INPE-14776-TDI/1229). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.23.12.15>
Acesso em: junho de 2014.

MARANI, L.; ALVALÁ, P.C. Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 8, p. 1627-1633, 2007.

MARANI, L.; ALVALÁ, P.C.; SILVA, M.G. **Protocolo para coleta, análise e determinação das concentrações de metano dissolvido em águas naturais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CR7MSS>.
Acesso em: junho de 2014.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC (NOAA). **The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)**. Spring, 2014. Available in: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>. Acesso em: Julho de 2014

OMETTO, J.P.; PACHECO, F.S.; CIMBLERIS, A.C.P.; STECH, J.L.; LORENZETTI, J.A.; ASSIREU, A.; SANTOS, M.A.; SIKAR, B.M.; ROSA, L.P.; GALLI, C.S.; ABE, D.S.; TUNDISI, J.G.; BARROS, N.O.; MENDONÇA, R.F.; ROLAND, F. Carbon Dynamic And Emissions In Brazilian Hydropower Reservoirs. In: ALCÂNTARA, E.H. (ed.). **Energy Resources: development,**

distribution and exploitation. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, Inc., 2011.

PETIT, J.; JOUZEL, J.; RAYNAUD, D.; BARKOV, N.; BARNOLA, J.-M.; BASILE, I.; BENDER, M.; CHAPPELLAZ, J.; DAVIS, M.; DELAYGUE, G.; DELMOTTE, M.; KOTLYAKOV, V.; LEGRAND, M.; LIPENKOV, V.; LORIUS, C.; PEPIN, L.; RITZ, C.; SALTZMAN, E.; STIEVENARD, M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, v. 399, p. 429– 436, 1999.

PRATHER, M.; EHHALT, D.; DENTENER, F.; DERWENT, R.G.; DLUGOKENCKY, E.; HOLLAND, E.; ISAKSEN, I.S.A.; KATIMA, J.; KIRCHHOFF, V.; MATSON, P.; MIDGLEY, P.M.; WANG, M. Atmospheric chemistry and greenhouse gases. In: **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. p. 239–287.

RASMUSSEN, R.; KHALIL, M. Atmospheric methane (CH₄): trends and seasonal cycles. **J. Geophys. Res.**, v. 86, p. 9826-9832, 1981.

ROGÉRIO, J.P.; SANTOS, M.A.; SANTOS, E.O. Influence of environmental variables on diffusive greenhouse gas fluxes at hydroelectric reservoirs in Brazil. **Braz. J. Bio.**, v. 73, n. 4, p. 753-764, 2013.

ROSA, L.P.; SCHAEFFER, R. Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs. **Ambio**, 23, p. 164-165, 1994.

ROSA, L.P.; SANTOS, M.A.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E.O.; SIKAR, E. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions. **Climatic Change**, v. 66, p. 9-21, 2004.

ROSLEV, P.; KING, G.M. Regulation of methane oxidation in a freshwater wetland by water table changes and anoxia. **FEMS Microbiol Ecol**, v. 19, p. 105-115, 1996.

RUDD, J. W. M.; HARRIS R.; KELLY C. A.; H. R. E. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? **Ambio**, v. 22, p. 246-248, 1993.

SANTOS, M.A.; ROSA, L.P.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E.O.; ROCHA, C.H.E.A.; SIKAR, E.; SILVA, M.B.; JUNIOR, A.M.P.B. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. **Oecol. Bras.**, v. 12, n. 1, p. 116-129, 2008.

SANTOS, M.A.; ROSA, L.P.; SILVA, M.B.; SANTOS, E.O.; ROCHA, C.H.E.D.; BENTES JR, A.P. Tropical reservoirs are bigger carbon sinks than soils. **Verh. Internat. Verein**, v. 30, Part 6, p. 838–840, Stuttgart, 2009.

SASS, R.L.; FISHER, F.M.; WANG, Y.B.; TURNER, F.T.; JUND, M.F. Methane emissions from rice fields: the effect of floodwater management. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 6, n. 3, p. 249-262, 1992. Sass et al., 1992.

SCHMIDT, U.; CONRAD, R. Hydrogen, carbon monoxide, and methane dynamics in Lake Constance. **Limnol Oceanogr**, v. 38, p. 1214-1226, 1993.

SEBACHER, I.D.; HARRISS, R.C.; BARTLETT, K.B. Methane flux across the air-water interface: air velocity effects. **Tellus**, v. 35B, p. 103-109, 1983.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N. **Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 1998.

SILVA, M.G. **Variação interanual e análise da influência de parâmetros ambientais na emissão de metano no Pantanal**. 2010. 106 p. sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.11.19.34-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37FH53S>>. Acesso em: 25 fev. 2015.

SIMPSON, I.J.; ROWLAND, F.S.; MEINARDI, S.; BLAKE, D.R. Influence of biomass burning during recent fluctuations in the slow growth of global tropospheric methane. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L22808, p. 1-5, 2006.

SMITH, L.K.; LEWIS, JR. W.M.; CHANTON, J.P.; CRONIN, G.; HAMILTON, S.K. Methane emission from the Orinoco River floodplain, Venezuela. **Biogeochemistry**, v. 51, n. 2, p. 113-140, Nov. 2000.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS (SNIF). **Recursos florestais: os biomas e suas florestas**. Brasília, 01 de Agosto de 2014. <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/os-biomas-e-suas-florestas>
Acesso em: Julho de 2014

ST LOUIS, V. L.; KELLY, C. A.; Duchemin, E.; Rudd, J. W. M.; Rosenberg, D. M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. **Bioscience**, v. 50, p. 766-775, 2000.

STERN, D.; KAUFMANN, R. Estimates of global anthropogenic methane emissions 1860-1993. **Chemosphere**, v. 33, n. 1, p. 159-176, July 1996.

SUBAK, S. Methane from the House of Tudor and the Ming Dynasty: anthropogenic emissions in the sixteenth century. **Chemosphere**, v.29, n. 5, p. 843-854, Sept. 1994.

STADMARK, J.; SEIFERT, A.G.; LEONARDSON, L. Transforming meadows into free surface water wetlands: Impact of increased nitrate and carbon loading on greenhouse gas production. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 1182-1188, 2009.

SWINNERTON, J.W.; LAMONTAGNE, R.A. Oceanic distribution of low-molecular-weight hydrocarbons. Baseline measurements. **Environ. Sci. Technol.**, v. 8, n. 7, p. 657-663, 1974.

THAUER, R.K.; KASTER, A.K.; SEEDORF, H.; BUCKEL, W.; HEDDERICH, R. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. **Microbiology**, v. 6, p. 579-591, 2008.

THAUER, R.K. SHIMA, S., Methane and microbes. **Nature**, v. 440, p. 878-879, 2006.

TUNDISI, J.G. Exploração do potencial hidrelétrico da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 109-117, 2007.

UPSTILL-GODDARD, R.C. Air-sea gas exchange in the coastal zone. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.70, p. 388-404, 2006.

WANG, Z.P.; DELAUNE, R.D.; MASSCHELEYN, P.H., et al. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 2, p. 382-385, 1993.

WANNINKHOF, R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, **J. Geophys. Res.**, v. 97, p. 7373-7382, 1992.

WANNINKHOF, R.; ASHER, W.E.; HO, D.T.; SWEENEY, C.; MCGILLIS, W.R. Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing. **Annu. Rev. Mar. Sci.**, v. 1, p. 213-244, 2009.

WEISS, R.F. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. **Deep-Sea Research**, v. 17, p. 721-735, 1970.

WEISS, R.F. Solubility of helium and neon in water and seawater. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 16, p. 234-241, 1971.

WIESENBURG, D.A.; GUINASSO, Jr., N.L. Equilibrium solubilities of metano, carbono monoxide, and hydrogen in water and sea water. **Journal of Chemical and Engineering Data.**, v. 24, n. 4, p. 356-360, 1979.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. San Diego: Academic Press, International Geophysics Series. p. 627, 2006.

WILLIAMS, R.T.; BAINBRIDGE, A.E. Dissolved CO, CH₄, and H₂ in the southern ocean. **J. Geophys. Res.**, v. 78, p. 2691-2694, 1973.

WOESE, C.R.; FOX, G.E. Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: the primary kingdoms. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 74, n. 11, p. 5088-5090, 1977.

WU, J., Laboratory studies of wind-wave interactions. **J. Fluid Mech.**, v. 34, p. 91-111, 1968.

WUEBBLES, D.J.; HAYHOE, K. Atmospheric methane and global change. **Earth-Science Reviews**, v. 57, p. 177-210, 2002.

YANG, S.S.; CHANG, H.L. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 69, n. 1, p. 69-80, 1998.

XIE, M.; LI, S.; JIANG, F.; WANG, T. Methane emissions from terrestrial plants over China and their effects on methane concentrations in lower troposphere. **Chinese Science Bulletin**, v. 54, n. 2, p. 304-310, 2009.

APÊNDICE A

BATALHA

Tabela.A.1 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Batalha.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Março/2011	25,2 ± 18,6 (32)	-	3,1 ± 2,0(20)
	20,5	-	2,3
	1,5 – 82,8	-	0,2-8,2
Camp 2 Julho2011	17,5 ± 15,2 (32)	-	3,7 ± 2,9(12)
	13,8	-	3,9
	0,8 – 66,3	-	0,3–7,5
Camp 3 Novembro/2011	21,1 ± 14,2 (19)	-	0,4 ± 0,4(9)
	20,2	-	0,2
	4,7 – 70,6	-	0,1-1,2
Camp 4 Novembro/2012	41,5 ± 24,2 (12)	-	8,4 ± 2,5(20)
	30,9	-	9,2
	21,9 – 106,1	-	1,2 - 11,6

Tabela A.2 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Batalha.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Março/2011	4±1	26±1	24±0	5,4±1,0	227±68	7,0±0,2	0,004±0,001
	4	26	24	5,6	223	7,0	0,004
	3 - 6	24 - 28	24 - 25	4,0-6,6	95 - 318	6,8 - 7,2	0,003-0,007
Camp 2 Julho2011	1±0	22±1	19±1	6,9±0,2	111±16	6,1±0,5	0,003±0,000
	1	22	19	6,9	120	6,0	0,003
	0,5-1,5	20 - 23	17 - 19	6,5-7,4	85 - 129	5,6-7,4	*
Camp 3 Novembro/2011	2±0	23±0	23±1	6,4±0,6	210±51	7,8±0,4	0,004±0,000
	2	23	23	6,4	215	7,8	0,004
	1 - 2	23 - 24	21 - 23	5,6-7,7	130 - 269	7,2-8,5	0,003-0,005
Camp 4 Novembro/2012	2±1	29±1	25±1	7,2±1,2	216±29	*	0,005±0,000
	2	29	5	7,7	203	*	0,005
	1-3	28-29	24-25	5,2-8,2	195-263	*	0,004 - 0,005

(*) Medidas não realizadas por avaria do sensor.

BELO MONTE

Tabela A.3 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Belo Monte.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Março/2012	15,7 ± 16,4 (26)	378,0 ± 327,2 (3)	6,0 ± 5,2(20)
	8,8	282,6	4,3
	1,1 – 83,2	109,2 – 742,3	0,6 - 16,5
Camp 2 Julho/2012	23,7 ± 25,6 (24)	3.722,2 ± 4.012,0 (2)	5,8 ± 3,4(45)
	16,6	3.722,2	3,4
	1,9 – 124,0	885,3 – 6.559,1	1,4 - 12,5
Camp 3 Outubro/2012	18,7 ± 17,3 (27)	-	3,3 ± 1,9(45)
	14,6	-	3,0
	2,3 – 93,5	-	1,1 - 8,2
Camp 4 Janeiro/2013	21,6 ± 17,0 (21)	-	5,3 ± 2,8(35)
	14,3	-	4,6
	4,4 – 56,2	-	0,9 - 9,9

Tabela A.4 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Belo Monte.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Março/2012	8±6	29±1	27±0	6,7±0,6	177±52	6,1±2,0	0,014±0,001
	7	29	27	6,8	190	6,7	0,014
	2-25	28-32	26-27	5,3-7,3	49-225	1,5-8,0	0,012-0,016
Camp 2 Julho/2012	4±7	29±2	29±1	8,2±0,4	179±44	7,2±1,4	0,014±0,002
	2	29	29	8,1	182	6,5	0,015
	1 - 21	26-32	26-30	7,5-8,7	70-213	5,8-9,2	0,010-0,015
Camp 3 Outubro/2012	4±4	32±1	30±1	8,1±0,2	228±14	*	0,011±0,001
	4	32	30	8,2	225	*	0,011
	0,5 - 10	30 - 33	27 - 31	7,6 - 8,3	205 - 248	*	0,008 - 0,012
Camp 4 Janeiro/2013	2±1	30±1	29±0	7,7±0,2	281±16	*	0,015±0,002
	2	30	29	7,7	286	*	0,014
	1,5- 3	29 - 31	*	7,5-8,0	246 - 297	*	0,014-0,019

(*) Medidas não realizadas por avaria do sensor.

SANTO ANTÔNIO

Tabela A.5 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Santo Antônio.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Maio/2011	43,7 ± 51,9 (19)	2.098,5 ± 3.430,0 (14)	6,4 ± 4,2(29)
	14,3	774,0	5,9
	3,0 – 176,0	17,5 - 12.551,3	2,1– 15,3
Camp 2 Agosto/2011	7,0 ± 5,4 (18)	-	3,7 ± 3,9(16)
	6,2	-	1,7
	0,4 – 20,0	-	1,3– 10,8
Camp 3 Novembro/2011	17,8 ± 26,8 (27)	-	3,8 ± 3,7(16)
	7,6	-	2,5
	0,4 – 114,8	-	1,7– 12,0
Camp 4 Fevereiro/2012	5,9 ± 4,3 (16)	2.424,0 ± 3.542,9 (3)	0,5 ± 0,2(12)
	5,6	562,7	0,5
	1,5 – 14,2	199,8 -6.509,6	0,4– 0,7

Tabela A.6 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Santo Antônio.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Maio/2011	4±3	29±1	27±1	6,6±1,6	76±61	7,6±1,0	0,037±0,018
	3	29	27	7,1	73	7,4	0,046
	2 - 9	27-31	27-29	3,5-9,6	(-16) - 221	6,4-10,4	0,005-0,051
Camp 2 Agosto/2011	4±3	32±2	27±1	7,8±0,5	105±45	2,9±0,4	0,053±0,028
	2	31	27	7,5	112	2,9	0,067
	1-9	30-37	24-28	7,2-8,8	36-169	2,2-3,5	0,007-0,072
Camp 3 Novembro/2011	3±2	31±1	29±2	7,5±0,6	170±38	7,4±0,5	0,076±0,028
	2	30	30	7,7	170	7,2	0,075
	1-5	30-32	25-30	6,1-8,0	105-222	6,9-8,1	0,012-0,100
Camp 4 Fevereiro/2012	6±3	27±0	27±0	7,4±0,2	154±16	3,8±1,7	0,044±0,013
	5	27	27	7,5	153	3,9	0,047
	2-11	26-27	26-28	7,0-7,8	126-190	1,4-6,4	0,010-0,051

BALBINA

Tabela A.7 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Balbina.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Março/2012	3,6 ± 3,0 (17)	-	1,2 ± 1,5(14)
	2,4	-	0,8
	0,8 – 11,0	-	0,2–4,6
Camp 2 Junho/2012	10,4 ± 7,0 (12)	398,4 ± 144,5 (6)	5,0 ± 7,2(36)
	7,8	417,4	1,3
	1,2 – 21,1	227,1 – 592,9	0,3–25,8
Camp 3 Setembro/2012	9,3 ± 7,6 (10)	857,1 ± 627,9 (6)	12,3 ± 12,6(40)
	5,9	666,1	3,7
	2,6 – 21,5	122,7 – 1.921,5	1,5–42,8
Camp 4 Dezembro/2012	17,5 ± 10,7 (9)	422,5 ± 211,5 (6)	17,0 ± 11,2(30)
	15,8	338,9	19,5
	4,8 – 35,8	228,2 – 763,7	2,0–40,4

Tabela A.8 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Balbina.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Março/2012	17±10	29±1	29±1	6,8±0,2	237±11	6,4±0,4	0,006±0,000
	12	29	29	6,8	239	6,3	0,006
	6-35	28-31	28-30	6,6-7,3	219-252	6,0-7,2	0,005-0,006
Camp 2 Junho/2012	18±10	29±1	30±1	7,4±0,6	194±77	5,6±1,4	0,006±0,001
	15	29	30	7,3	216	4,9	0,006
	9-40	28-31	29-30	6,8-8,5	60-285	4,1-7,8	0,005-0,007
Camp 3 Setembro/2012	18±9	30±3	31±1	7,5±0,5	159±67	-	0,007±0,001
	14	30	31	7,7	170	-	0,006
	12-34	25-34	30-33	6,8-8,0	50-231	-	0,005-0,009
Camp 4 Dezembro/2012	18±8	30±1	30±30	7,0±0,3	281±41	-	0,007±0,001
	15	30	30	6,9	293	-	0,006
	11-33	29-30	29-30	6,6-7,9	209-322	-	0,006-0,009

(*) Medidas não realizadas por avaria do sensor.

FUNIL

Tabela A.9 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Funil.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Julho/2011	6,4 ± 5,2 (22)	1.035,9 ± 569,7 (3)	0,8 ± 1,0(22)
	4,8	901,4	0,4
	1,3 – 19,6	545,5 – 1.660,8	0,1–2,4
Camp 2 Outubro/2011	9,5 ± 6,8 (21)	303,1 ± 188,8 (2)	0,3 ± 0,3(16)
	7,3	303,1	0,2
	1,3 – 24,1	169,6 – 436,6	0,1–1,1
Camp 3 Janeiro/2012	8,4 ± 8,4 (18)	437,2 (1)	1,2 ± 1,5(10)
	4,9	-	1,2
	1,0 – 34,4	-	0,1–2,2
Camp 4 Maio/2012	6,2 ± 4,9 (15)	-	0,4 ± 0,6(14)
	4,5	-	0,2
	0,2 – 17,7	-	0,1–1,5
Camp 5 Setembro/2013	7,0 ± 3,8 (39)	56,6 ± 21,0 (4)	4,9 ± 4,8(90)
	6,5	54,2	3,2
	2,0 – 19,9	33,5 – 80,6	0,7 – 18,6

Tabela A.10 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Funil.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Julho/2011	19±11	22±2	21±0	7,4±0,4	145±44	8,5±1,7	0,045±0,004
	17	22	21	7,3	160	7,7	0,044
	5-40	19 – 25	20-21	6,9-8,1	53-192	7,2-12,4	0,040-0,050
Camp 2 Outubro/2011	16±9	25±1	24±0	7,8±0,9	128±68	8,9±0,7	0,046±0,001
	15	25	24	7,8	154	8,8	0,045
	4-33	24 – 25	23-24	6,6-9,4	(-26) - 208	7,7-9,8	0,044-0,047
Camp 3 Janeiro/2012	17±7	23±1	22±1	7,7±0,5	109±33	6,0±3,8	0,044±0,004
	15	23	22	7,7	120	7,0	0,045
	7-30	22 – 24	21-24	6,9-8,3	57-155	1,4-11,3	0,040-0,050
Camp 4 Maio/2012	29±13	29±1	25±0	8,3±0,2	167±10	6,1±0,5	0,052±0,001
	32	30	25	8,1	164	6,1	0,052
	7-43	28 – 30	24-26	8,0-8,6	154-183	5,3-6,8	0,051-0,054
Camp 5 Setembro/2013	*	*	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*	*	*

(*) Parâmetros ambientais não foram medidos nesta campanha.

ITAIPU

Tabela A.11 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Itaipu.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Janeiro/2012	17,4 ± 23,7 (36)	-	2,9 ± 3,6(26)
	8,0	-	1,2
	0,8 – 129,3	-	0,4–10,9
Camp 2 Maio/2012	14,5 ± 22,1 (21)	-	4,1 ± 6,8(44)
	7,1	-	1,2
	1,1 – 96,1	-	0,1–23,6
Camp 3 Agosto/2012	5,8 ± 5,2 (18)	2.064,3 ± 1.267,1 (3)	2,0 ± 3,0(45)
	3,7	1.466,6	0,8
	0,3 – 16,2	(1.206,6 -3.519,8)	0,1–11,3
Camp 4 Novembro/2012	31,1 ± 28,3 (20)	-	4,6 ± 4,8(35)
	19,2	-	2,0
	5,3 – 94,2	-	1,1–17,4
Camp 5 Março/2013	5,0 ± 4,0 (17)	-	0,5 ± 0,2(40)
	3,2	-	0,5
	0,1 – 13,1	-	0,1 – 0,8

Tabela A.12 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Itaipu.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Janeiro/2012	21±19	31±1	29±1	8,1±0,2	112±25	6,5±1,1	0,038±0,003
	11	31	29	8,1	109	6,5	0,038
	4-120	29-32	28-30	7,7-8,4	50-140	5,1-9,7	0,032-0,044
Camp 2 Maio/2012	11±7	25±2	22±0	8,4±0,2	202±39	9,1±0,6	0,034±0,003
	9	25	22	8,4	216	9,0	0,034
	2-26	23-28	21-23	8,0-8,7	133-237	8,5-11,0	0,032-0,041
Camp 3 Agosto/2012	15±12	27±3	22±0	8,5±0,3	159±6	7,8±0,6	0,038±0,012
	11	26	22	8,6	158	8,0	0,034
	6-44	23-33	21-22	8,0-8,9	152-178	7,0-8,6	0,031-0,066
Camp 4 Novembro/2012	15±9	33±2	29±1	9,2±0,3	161±16	*	0,044±0,012
	14	34	29	9,0	164	*	0,041
	5-34	29-35	28-30	8,8-9,7	138-180	*	0,036-0,071
Camp 5 Março/2013	**	30±2	28±1	8,5±0,4	213±30	*	0,039±0,001
	**	30	28	8,7	200	*	0,038
	**	27 - 32	27 - 29	8,0 - 9,0	177 - 245	*	0,038 - 0,040

(*) Medidas não realizadas por avaria do sensor.

(**) Medição de profundidade não realizada.

SEGREDO

Tabela A.13 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Segredo.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Janeiro/2012	6,7 ± 4,6 (19)	-	3,3 ± 4,7 (13)
	5,5	-	2,4
	0,7 – 15,5	-	0,1–13,7
Camp 2 Agosto/2012	8,8 ± 11,4 (16)	-	0,2 ± 0,1 (30)
	5,3	-	0,2
	0,2 – 42,1	-	0,2–5,5
Camp 3 Outubro/2012	12,2 ± 15,3 (15)	437,4 (1)	0,5 ± 0,2 (30)
	7,1	-	0,4
	0,5 – 60,8	-	0,2–4,7
Camp 4 Novembro/2012	7,5 ± 5,5 (17)	-	0,4 ± 0,1 (29)
	6,7	-	0,4
	0,9 – 23,5	-	0,3–1,9

Tabela A.14 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Segredo.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Janeiro/2012	32±14	26±2	25±2	8,0±0,3	150±17	7,3±1,1	0,028±0,002
	33	26	26	7,9	152	7,5	0,028
	15-60	24-27	21-30	7,6-8,5	117-172	5,2-9,1	0,025-0,031
Camp 2 Agosto/2012	14±12	22±2	18±1	8,4±0,1	204±11	6,2±1,4	0,023±0,002
	9	22	18	8,4	205	6,6	0,023
	4-30	19-24	16-20	8,3-8,6	192-217	4,1-7,6	0,020-0,024
Camp 3 Outubro/2012	29±8	22±0	19±0	8,6±0,2	205±25	*	0,025±0,001
	25	22	19	8,5	222	*	0,025
	25-60	21-22	18-19	8,3-8,9	131 - 223	*	0,022-0,026
Camp 4 Novembro/2012	26±7	27±1	24±1	9,6±0,5	161±25	*	0,031±0,003
	27	27	24	9,7	164	*	0,033
	17 - 36	25 - 29	22 - 26	9,1 - 10,3	117 - 196	*	0,024- 0,034

(*) Medidas não realizadas por avaria do sensor.

SERRA DA MESA

Tabela A.15 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Serra da Mesa.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Junho/2011	3,5 ± 2,2 (24)	-	0,9 ± 0,7 (30)
	3,4	-	0,8
	0,6 – 10,5	-	0,2–2,4
Camp 2 Outubro/2011	7,9 ± 7,4 (19)	-	1,4 ± 0,9 (14)
	6,3	-	1,5
	1,7 – 36,1	-	0,3–2,4
Camp 3 Dezembro/2011	6,7 ± 4,3 (19)	-	1,9 ± 3,2 (21)
	5,0	-	1,2
	2,0 – 18,4	-	0,2–10,4
Camp 4 Abril/2012	11,0 ± 8,6 (23)	-	3,7 ± 2,5 (29)
	7,4	-	2,9
	1,9 – 37,7	-	0,3–10,1

Tabela A.16 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Serra da Mesa.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Junho/2011	60±42	28±4	26±0	7,7±0,2	100±18	7,0±0,8	0,056±0,005
	50	29	26	7,7	103	6,7	0,058
	10-150	20-33	26-27	7,3-8,1	65-129	6,3-9,0	0,049-0,063
Camp 2 Outubro/2011	36±19	28±2	27±0	8,0±0,2	106±44	7,9±0,3	0,060±0,002
	30	29	27	8,0	88	7,8	0,061
	14-60	24-31	26-28	7,6-8,4	56-177	7,7-8,4	0,055-0,062
Camp 3 Dezembro/2011	38±16	30±0	28±0	8,7±0,2	115±15	7,2±0,4	0,059±0,001
	30	30	27	8,7	118	7,1	0,059
	25-70	29-30	27-29	8,4-8,9	91-136	6,8-7,9	0,057-0,061
Camp 4 Abril/2012	40±23	31±3	30±1	9,0±0,3	118±20	6,6±0,9	0,064±0,002
	40	31	29	8,9	119	6,4	0,064
	7-70	27-35	29-31	8,7-9,6	76-141	5,5-8,8	0,061-0,069

TRÊS MARIAS

Tabela A.17 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Três Marias.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Maio/2011	3,7 ± 2,1 (37)	123,0 ± 81,4 (3)	0,3 ± 0,1(51)
	3,8	117,0	0,4
	0,4 – 8,5	44,7 – 207,1	0,3- 0,4
Camp 2 Agosto/2011	4,8 ± 3,3 (39)	192,6 ± 142,0 (4)	0,8 ± 1,1(29)
	3,9	177,5	0,6
	0,3 – 12,1	49,2 – 366,3	0,1 - 4,3
Camp 3 Novembro/2011	5,8 ± 3,9 (20)	30,8 ± 8,1 (5)	1,3 ± 0,9(22)
	4,8	28,3	1,2
	1,3 – 18,2	22,2 – 43,8	0,3- 3,4
Camp 4 Fevereiro/2012	7,3 ± 5,0 (20)	20,7 (1)	1,5 ± 1,7(15)
	6,4	-	0,7
	0,8 – 18,8	-	0,2 - 4,7

Tabela A.18 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Três Marias.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Maio/2011	17±8	26±2	25±0	7,4±0,6	96±37	7,0±0,3	0,036±0,002
	19	25	25	7,3	98	7,0	0,037
	1-25	22 – 29	25-26	6,3-8,7	23-158	6,37,6	0,032-0,039
Camp 2 Agosto/2011	23±12	26±3	*	*	*	*	*
	25	26	*	*	*	*	*
	3- 49	21 – 30	*	*	*	*	*
Camp 3 Novembro/2011	19±12	27±0	26±1	8,2±0,2	133±25	4,7±2,3	0,042±0,006
	20	27	26	8,1	130	5,3	0,039
	3- 40	26- 28	25- 27	8,0- 8,8	89- 163	1,7- 7,7	0,037- 0,058
Camp 4 Fevereiro/2012	23 ±16	29±1	28±1	8,4±0,2	140±20	6,9±1,3	0,039±0,001
	24	29	28	8,4	144	7,2	0,040
	2- 50	27- 30	25-30	8,1-8,6	96- 163	3,6- 8,0	0,036- 0,040

(*) Medidas não realizadas por avaria do sensor.

TUCURUÍ

Tabela A.19 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Tucuruí.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Junho/2011	6,0 ± 4,7 (26)	45,8 ± 7,1 (2)	3,6 ± 3,4(27)
	4,4	44,8	2,4
	1,7 – 22,0	40,7 – 50,8	1,0 – 11,5
Camp 2 Outubro/2011	9,6 ± 12,8 (22)	231,7 ± 130,1 (4)	2,8 ± 4,2(16)
	5,3	237,3	1,1
	1,4 – 48,8	77,8 – 374,6	0,5–12,1
Camp 3 Dezembro/2011	6,4 ± 6,3 (10)	113,7 ± 119,6 (3)	1,0 ± 0,8(6)
	4,3	56,2	0,9
	0,9 – 21,1	33,8 – 251,2	0,2– 2,3
Camp 4 Abril/2012	8,8 ± 7,5 (18)	-	2,6 ± 1,8(41)
	5,4	-	2,4
	2,0 – 23,5	-	0,1–11,2

Tabela A.20 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Tucuruí.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Junho/2011	30±17	32±2	31±1	7,3±0,6	105±36	6,3±0,2	0,028±0,002
	25	32	30	7,2	96	6,2	0,028
	9-70	27-35	29-32	6,7-8,7	36-160	6,0-6,6	0,026-0,031
Camp 2 Outubro/2011	22±13	31±1	30±1	7,5±0,3	126±31	6,8±0,9	0,032±0,002
	19	31	30	7,6	122	6,6	0,031
	10-50	30-32	29-31	6,9-8,0	93-196	6,0-8,6	0,030-0,036
Camp 3 Dezembro/2011	20±15	31±1	30±1	7,6±0,6	146±33	6,7±0,7	0,035±0,007
	15	32	30	7,7	147	6,6	0,032
	7-45	30-33	29-31	6,8-8,4	95-196	5,6-7,6	0,029-0,049
Camp 4 Abril/2012	22±9	32±3	30±1	8,1±0,2	165±36	8,4±1,3	0,028±0,001
	20	33	30	8,0	179	8,6	0,028
	12-35	28-37	29-31	7,9-8,6	94-193	6,5-9,8	0,027-0,029

XINGÓ

Tabela A.21 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos fluxos e metano dissolvido obtidos nas campanhas de Xingó.

	Fluxo (mg CH ₄ m ⁻² d ⁻¹)		MD (µg/l)
	Difusivo(n)	Ebulitivo(n)	
Camp 1 Abril/2012	11,5 ± 11,8 (29)	-	1,5 ± 1,2(30)
	7,6	-	1,2
	2,1 – 51,1	-	0,5–6,0
Camp 2 Junho/2012	9,0 ± 5,5 (24)	-	1,3 ± 1,2(40)
	8,0	-	1,1
	1,7 – 29,8	-	0,3–7,7
Camp 3 Setembro/2012	10,7 ± 12,3 (25)	128,6 (1)	1,0 ± 0,8(24)
	6,8	-	0,8
	1,6 – 56,0	-	0,2–3,1
Camp 4 Dezembro/2012	15,3 ± 11,9 ((19)	208,7 (1)	3,6 ± 3,9(40)
	10,4	-	2,5
	3,5 – 43,1	-	1,1–20,5

Tabela A.22 – Média, desvio padrão, mediana e faixa de variação dos parâmetros ambientais obtidos nas campanhas de Xingó.

	Prof (m)	Temp Ar (°C)	Temp Água (°C)	pH	ORP (mV)	OD (mg/l)	TSD (g/l)
Camp 1 Abril/2012	12±12	29±1	28±1	8,9±0,2	88±24	8,6±0,4	0,045±0,001
	8	29	28	8,9	90	8,5	0,045
	5-47	28-30	27-29	8,6-9,4	57-120	8,0-9,3	0,044-0,048
Camp 2 Junho/2012	42±29	28±1	26±0	9,1±0,1	121±13	6,7±1,1	0,045±0,001
	30	29	26	9,1	127	7,0	0,045
	10-100	26-30	25-26	8,7-9,2	99-135	4,5-8,1	0,045 - 0,046
Camp 3 Setembro/2012	25±22	33±1	26±0	8,7±0,1	172±15	*	0,049±0,001
	11	32	26	8,7	177	*	0,049
	8-70	32-34	25-26	8,6-9,1	147-192	*	0,048-0,051
Camp 4 Dezembro/2012	7±2	33±1	27±0	8,7±0,5	141±37	*	0,050±0,001
	7	33	28	8,9	156	*	0,050
	6-10	31-35	27-28	7,5-9,2	65-180	*	0,048-0,051

(*) Medidas não realizadas por avaria do sensor.

APÊNDICE B

Tabelas utilizadas para análise estatística da correlação de fluxos e parâmetros ambientais

BATALHA

Correlations (Tabela Fluxo PA Batalha)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=61 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	,1331	,1771	-,0340	-,2526	,2063	-,0855	-,2133
	p= ---	p=,307	p=,172	p=,795	p=,050	p=,111	p=,512	p=,099
Prof	,1331	1,0000	,7259	,6824	-,8055	,6986	,1691	,4563
	p=,307	p= ---	p=,000	p=,000	p=,000	p=,000	p=,193	p=,000
TempAr	,1771	,7259	1,0000	,7334	-,6664	,5422	,2695	,4737
	p=,172	p=,000	p= ---	p=,000	p=,000	p=,000	p=,036	p=,000
TempAgua	-,0340	,6824	,7334	1,0000	-,5530	,6684	,5519	,6720
	p=,795	p=,000	p=,000	p= ---	p=,000	p=,000	p=,000	p=,000
pH	-,2526	-,8055	-,6664	-,5530	1,0000	-,8754	-,1826	-,1940
	p=,050	p=,000	p=,000	p=,000	p= ---	p=0,00	p=,159	p=,134
ORP	,2063	,6986	,5422	,6684	-,8754	1,0000	,4619	,1515
	p=,111	p=,000	p=,000	p=,000	p=0,00	p= ---	p=,000	p=,244
OD	-,0855	,1691	,2695	,5519	-,1826	,4619	1,0000	,2448
	p=,512	p=,193	p=,036	p=,000	p=,159	p=,000	p= ---	p=,057
TSD	-,2133	,4563	,4737	,6720	-,1940	,1515	,2448	1,0000
	p=,099	p=,000	p=,000	p=,000	p=,134	p=,244	p=,057	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)			
Marked correlations are significant at $p < ,05000$			
N=61 (Casewise deletion of missing data)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	-,1087
	p= ---	p=1,00	p=,404
Factor 2	,0000	1,0000	-,3594
	p=1,00	p= ---	p=,004
Fluxo	-,1087	-,3594	1,0000
	p=,404	p=,004	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Batalha)		
Extraction: Principal components		
(Marked loadings are $> ,700000$)		
Variable	Factor 1	Factor 2
Prof	-,875124	-,209624
TempAr	-,838606	0,015569
TempAgua	-,894266	0,330729
pH	0,835921	0,495708
ORP	-,839783	-,344980
OD	-,480257	0,438621
TSD	-,560744	0,656381
Expl. Var	4,217893	1,141527
Prp.Totl	0,602556	0,163075

Apêndice B.1: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Batalha.

BELO MONTE

Correlations (Tabela Fluxo PA Belo Monte)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=46 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,3012	-,1673	,2017	,1776	,0407	-,3782	,1051
	p= ---	p=,042	p=,266	p=,179	p=,238	p=,788	p=,010	p=,487
Prof	-,3012	1,0000	,1069	-,1492	-,3509	,0876	,4012	-,0292
	p=,042	p= ---	p=,480	p=,322	p=,017	p=,563	p=,006	p=,847
TempAr	-,1673	,1069	1,0000	-,1230	-,1999	,0933	-,0410	,0100
	p=,266	p=,480	p= ---	p=,416	p=,183	p=,537	p=,787	p=,948
TempAgua	,2017	-,1492	-,1230	1,0000	,8470	-,2857	,0096	,7894
	p=,179	p=,322	p=,416	p= ---	p=,000	p=,054	p=,950	p=,000
pH	,1776	-,3509	-,1999	,8470	1,0000	-,3701	-,0426	,5735
	p=,238	p=,017	p=,183	p=,000	p= ---	p=,011	p=,778	p=,000
ORP	,0407	,0876	,0933	-,2857	-,3701	1,0000	-,1182	-,2076
	p=,788	p=,563	p=,537	p=,054	p=,011	p= ---	p=,434	p=,166
OD	-,3782	,4012	-,0410	,0096	-,0426	-,1182	1,0000	-,2319
	p=,010	p=,006	p=,787	p=,950	p=,778	p=,434	p= ---	p=,121
TSD	,1051	-,0292	,0100	,7894	,5735	-,2076	-,2319	1,0000
	p=,487	p=,847	p=,948	p=,000	p=,000	p=,166	p=,121	p= ---

Correlations (Spreadsheet5)				
Marked correlations are significant at $p < ,05000$				
N=46 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	-,0000	,2259
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,131
Factor 2	,0000	1,0000	-,0000	-,3593
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,014
Factor 3	-,0000	-,0000	1,0000	-,0898
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,553
Fluxo	,2259	-,3593	-,0898	1,0000
	p=,131	p=,014	p=,553	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Belo Monte)			
Extraction: Principal components			
(Marked loadings are $> ,700000$)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Prof	-,351546	0,712301	0,358102
TempAr	-,207802	-0,051053	0,791464
TempAgua	0,926842	0,179614	0,155551
pH	0,911839	0,043705	-0,099814
ORP	-0,459011	-0,318837	0,303415
OD	-0,169102	0,851147	-0,185794
TSD	0,802652	0,038688	0,429890
Expl.Var	2,740791	1,371756	1,100196
Prp.Totl	0,391542	0,195965	0,157171

Apêndice B.2: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Belo Monte.

SANTO ANTÔNIO

Correlations (Tabela Fluxo PA Sta)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=74 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,1354	-,0108	-,0342	-,3408	-,2597	,2954	-,2885
	p= ---	p=,250	p=,927	p=,773	p=,003	p=,025	p=,011	p=,013
Prof	-,1354	1,0000	-,2528	-,2326	-,0907	-,2371	-,1733	-,1556
	p=,250	p= ---	p=,030	p=,046	p=,442	p=,042	p=,140	p=,186
TempAr	-,0108	-,2528	1,0000	,4385	,1106	-,0088	,2387	,3179
	p=,927	p=,030	p= ---	p=,000	p=,348	p=,941	p=,041	p=,006
TempAgua	-,0342	-,2326	,4385	1,0000	-,0951	,5570	,6091	,4121
	p=,773	p=,046	p=,000	p= ---	p=,420	p=,000	p=,000	p=,000
pH	-,3408	-,0907	,1106	-,0951	1,0000	-,0661	-,1227	,3743
	p=,003	p=,442	p=,348	p=,420	p= ---	p=,576	p=,298	p=,001
ORP	-,2597	-,2371	-,0088	,5570	-,0661	1,0000	,1094	,3101
	p=,025	p=,042	p=,941	p=,000	p=,576	p= ---	p=,354	p=,007
OD	,2954	-,1733	,2387	,6091	-,1227	,1094	1,0000	,3459
	p=,011	p=,140	p=,041	p=,000	p=,298	p=,354	p= ---	p=,003
TSD	-,2885	-,1556	,3179	,4121	,3743	,3101	,3459	1,0000
	p=,013	p=,186	p=,006	p=,000	p=,001	p=,007	p=,003	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)				
Marked correlations are significant at $p < ,05000$				
N=74 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	-,0000	,0607
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,607
Factor 2	,0000	1,0000	,0000	-,3178
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,006
Factor 3	-,0000	,0000	1,0000	,3683
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,001
Fluxo	,0607	-,3178	,3683	1,0000
	p=,607	p=,006	p=,001	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Sta)			
Extraction: Principal components			
(Marked loadings are $> ,700000$)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Prof	0,461101	-0,109641	0,137664
TempAr	-0,571477	0,255111	0,526875
TempAgua	-0,873923	-0,285397	0,012825
pH	-0,102725	0,899808	-0,176281
ORP	-0,562589	-0,283028	-0,722522
OD	-0,669056	-0,268599	0,393302
TSD	-0,684346	0,437750	-0,127681
Expl. Var	2,545967	1,312084	1,020815
Prp. Totl	0,363710	0,187441	0,145831

Apêndice B.3: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Santo Antônio.

BALBINA

Correlations (Tabela Fluxo PA Balbina)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=26 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	,2365	,2284	,4501	,5299	-,1022	,0317	-,0793
	p= ---	p=,245	p=,262	p=,021	p=,005	p=,619	p=,878	p=,700
Prof	,2365	1,0000	,4061	,4997	,0177	,3161	,3422	-,3109
	p=,245	p= ---	p=,040	p=,009	p=,932	p=,116	p=,087	p=,122
TempAr	,2284	,4061	1,0000	,6315	-,2463	,6833	-,3924	-,0461
	p=,262	p=,040	p= ---	p=,001	p=,225	p=,000	p=,047	p=,823
TempAgua	,4501	,4997	,6315	1,0000	,2963	,2466	,1403	,0799
	p=,021	p=,009	p=,001	p= ---	p=,142	p=,225	p=,494	p=,698
pH	,5299	,0177	-,2463	,2963	1,0000	-,7533	,2779	-,1684
	p=,005	p=,932	p=,225	p=,142	p= ---	p=,000	p=,169	p=,411
ORP	-,1022	,3161	,6833	,2466	-,7533	1,0000	-,4785	,0355
	p=,619	p=,116	p=,000	p=,225	p=,000	p= ---	p=,013	p=,863
OD	,0317	,3422	-,3924	,1403	,2779	-,4785	1,0000	,1060
	p=,878	p=,087	p=,047	p=,494	p=,169	p=,013	p= ---	p=,606
TSD	-,0793	-,3109	-,0461	,0799	-,1684	,0355	,1060	1,0000
	p=,700	p=,122	p=,823	p=,698	p=,411	p=,863	p=,606	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)				
Marked correlations are significant at $p < ,05000$				
N=26 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	-,0000	-,0000	-,0543
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,792
Factor 2	-,0000	1,0000	-,0000	,4862
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,012
Factor 3	-,0000	-,0000	1,0000	,0125
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,952
Fluxo	-,0543	,4862	,0125	1,0000
	p=,792	p=,012	p=,952	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Balbina)			
Extraction: Principal components			
(Marked loadings are $> ,700000$)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Prof	-,465842	0,697159	0,152872
TempAr	-,893671	0,190312	-0,028091
TempAgua	-0,493524	0,714297	-0,301902
pH	0,544762	0,635937	0,098576
ORP	-,928102	-0,266415	-0,025847
OD	0,446155	0,591806	-0,313660
TSD	0,042752	-0,242483	-,950458
Expl.Var	2,618245	1,916895	1,127441
Prp.Totl	0,374035	0,273842	0,161063

Apêndice B.4: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Balbina.

FUNIL

Correlations (Tabela Fluxo PA Funil)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=76 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,1264	-,0703	-,0141	-,0269	,0544	,0717	,0358
	p= ---	p=,276	p=,546	p=,904	p=,818	p=,641	p=,538	p=,759
Prof	-,1264	1,0000	,2242	,1865	,4119	-,0286	,0270	,0396
	p=,276	p= ---	p=,052	p=,107	p=,000	p=,806	p=,817	p=,734
TempAr	-,0703	,2242	1,0000	,8554	,4676	,2366	-,1744	,6789
	p=,546	p=,052	p= ---	p=0,00	p=,000	p=,040	p=,132	p=,000
TempAgua	-,0141	,1865	,8554	1,0000	,4311	,0683	-,1106	,5050
	p=,904	p=,107	p=0,00	p= ---	p=,000	p=,558	p=,342	p=,000
pH	-,0269	,4119	,4676	,4311	1,0000	-,5477	-,0692	,3463
	p=,818	p=,000	p=,000	p=,000	p= ---	p=,000	p=,553	p=,002
ORP	,0544	-,0286	,2366	,0683	-,5477	1,0000	,1851	,1279
	p=,641	p=,806	p=,040	p=,558	p=,000	p= ---	p=,110	p=,271
OD	,0717	,0270	-,1744	-,1106	-,0692	,1851	1,0000	-,4581
	p=,538	p=,817	p=,132	p=,342	p=,553	p=,110	p= ---	p=,000
TSD	,0358	,0396	,6789	,5050	,3463	,1279	-,4581	1,0000
	p=,759	p=,734	p=,000	p=,000	p=,002	p=,271	p=,000	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)				
Marked correlations are significant at $p < ,05000$				
N=76 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	,0000	-,0485
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,678
Factor 2	,0000	1,0000	,0000	-,0652
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,576
Factor 3	,0000	,0000	1,0000	,0189
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,871
Fluxo	-,0485	-,0652	,0189	1,0000
	p=,678	p=,576	p=,871	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Funil)				
Extraction: Principal components				
(Marked loadings are $> ,700000$)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	
Prof	0,356099	0,350713	-0,542178	
TempAr	0,913289	-0,281533	-0,145418	
TempAgua	0,843451	-0,166737	-0,177990	
pH	0,673681	0,647139	-0,127624	
ORP	-0,038108	-0,902032	-0,302520	
OD	-0,351631	-0,025276	-0,802651	
TSD	0,779681	-0,264672	0,344007	
Expl.Var	2,859157	1,533202	1,217180	
Prp.Totl	0,408451	0,219029	0,173883	

Apêndice B.5: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Funil.

ITAIPU

Correlations (Tabela Fluxo PA Itaipu)							
Marked correlations are significant at $p < ,05000$							
N=72 (Casewise deletion of missing data)							
Variable	Fluxo	Prof	Temp	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,1958	,1149	-,0647	,0044	-,1087	,0359
	p= ---	p=,099	p=,336	p=,589	p=,971	p=,363	p=,765
Prof	-,1958	1,0000	,0786	-,1095	-,2029	,1736	-,0472
	p=,099	p= ---	p=,511	p=,360	p=,087	p=,145	p=,694
Temp	,1149	,0786	1,0000	-,6201	-,7227	-,7725	,6610
	p=,336	p=,511	p= ---	p=,000	p=,000	p=,000	p=,000
pH	-,0647	-,1095	-,6201	1,0000	,3223	,5373	-,3562
	p=,589	p=,360	p=,000	p= ---	p=,006	p=,000	p=,002
ORP	,0044	-,2029	-,7227	,3223	1,0000	,6443	-,6930
	p=,971	p=,087	p=,000	p=,006	p= ---	p=,000	p=,000
OD	-,1087	,1736	-,7725	,5373	,6443	1,0000	-,4152
	p=,363	p=,145	p=,000	p=,000	p=,000	p= ---	p=,000
TSD	,0359	-,0472	,6610	-,3562	-,6930	-,4152	1,0000
	p=,765	p=,694	p=,000	p=,002	p=,000	p=,000	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)			
Marked correlations are significant at $p < ,05000$			
N=72 (Casewise deletion of missing data)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Fluxo
Factor 1	1,0000	-,0000	,0787
	p= ---	p=1,00	p=,511
Factor 2	-,0000	1,0000	,1998
	p=1,00	p= ---	p=,092
Fluxo	,0787	,1998	1,0000
	p=,511	p=,092	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Itaipu)		
Extraction: Principal components		
(Marked loadings are $> ,700000$)		
Variable	Factor 1	Factor 2
Prof	0,059521	0,989000
Temp	0,936388	0,013925
pH	-0,676993	-0,068381
ORP	-0,845962	-0,181102
OD	-0,831440	0,281989
TSD	0,766625	-0,048195
Expl.Var	3,333344	1,097630
Prp.Totl	0,555557	0,182938

Apêndice B.6: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Itaipu.

SEGREDO

Correlations (Tabela Fluxo PA Segredo)
Marked correlations are significant at $p < ,05000$
N=28 (Casewise deletion of missing data)

Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempÁgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,2431	,2257	-,1012	,1723	,4421	-,4132	-,2210
	p= ---	p=,213	p=,248	p=,608	p=,381	p=,019	p=,029	p=,258
Prof	-,2431	1,0000	,6060	,6259	,0180	-,5530	,4161	,6849
	p=,213	p= ---	p=,001	p=,000	p=,928	p=,002	p=,028	p=,000
TempAr	,2257	,6060	1,0000	,8904	-,3825	-,5413	,3549	,6836
	p=,248	p=,001	p= ---	p=,000	p=,045	p=,003	p=,064	p=,000
TempÁgua	-,1012	,6259	,8904	1,0000	-,5066	-,7005	,5995	,6770
	p=,608	p=,000	p=,000	p= ---	p=,006	p=,000	p=,001	p=,000
pH	,1723	,0180	-,3825	-,5066	1,0000	,4539	-,4767	-,5136
	p=,381	p=,928	p=,045	p=,006	p= ---	p=,015	p=,010	p=,005
ORP	,4421	-,5530	-,5413	-,7005	,4539	1,0000	-,3799	-,7800
	p=,019	p=,002	p=,003	p=,000	p=,015	p= ---	p=,046	p=,000
OD	-,4132	,4161	,3549	,5995	-,4767	-,3799	1,0000	,3696
	p=,029	p=,028	p=,064	p=,001	p=,010	p=,046	p= ---	p=,053
TSD	-,2210	,6849	,6836	,6770	-,5136	-,7800	,3696	1,0000
	p=,258	p=,000	p=,000	p=,000	p=,005	p=,000	p=,053	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)
Marked correlations are significant at $p < ,05000$
N=28 (Casewise deletion of missing data)

Variable	Factor 1	Factor 2	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	,2334
	p= ---	p=1,00	p=,232
Factor 2	,0000	1,0000	,1258
	p=1,00	p= ---	p=,524
Fluxo	,2334	,1258	1,0000
	p=,232	p=,524	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Segredo)
Extraction: Principal components
(Marked loadings are $> ,700000$)

Variable	Factor 1	Factor 2
Prof	-,730673	0,583961
TempAr	-,840901	0,160646
TempÁgua	-,928618	-0,008042
pH	0,579901	0,762865
ORP	0,821697	-0,024860
OD	-0,631334	-0,338652
TSD	-,876434	0,092940
Expl. Var	4,281519	1,072787
Prp. Totl	0,611646	0,153255

Apêndice B.7: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Segredo.

SERRA DA MESA

Correlations (Tabela Fluxo PA SM)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=89 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,1042	,2529	,4594	,4593	,0068	,0119	,3280
	p= ---	p=,331	p=,017	p=,000	p=,000	p=,950	p=,912	p=,002
Prof	-,1042	1,0000	-,1348	-,0622	-,0782	-,0288	,1740	,1232
	p=,331	p= ---	p=,208	p=,563	p=,466	p=,789	p=,103	p=,250
TempAr	,2529	-,1348	1,0000	,3981	,3298	-,0453	-,3384	,1112
	p=,017	p=,208	p= ---	p=,000	p=,002	p=,674	p=,001	p=,299
TempAgua	,4594	-,0622	,3981	1,0000	,8474	,1536	-,3289	,6953
	p=,000	p=,563	p=,000	p= ---	p=0,00	p=,151	p=,002	p=,000
pH	,4593	-,0782	,3298	,8474	1,0000	-,0583	-,1701	,7757
	p=,000	p=,466	p=,002	p=0,00	p= ---	p=,587	p=,111	p=0,00
ORP	,0068	-,0288	-,0453	,1536	-,0583	1,0000	-,0736	-,0809
	p=,950	p=,789	p=,674	p=,151	p=,587	p= ---	p=,493	p=,451
OD	,0119	,1740	-,3384	-,3289	-,1701	-,0736	1,0000	,0497
	p=,912	p=,103	p=,001	p=,002	p=,111	p=,493	p= ---	p=,644
TSD	,3280	,1232	,1112	,6953	,7757	-,0809	,0497	1,0000
	p=,002	p=,250	p=,299	p=,000	p=0,00	p=,451	p=,644	p= ---

Correlations (Spreadsheets5)				
Marked correlations are significant at $p < ,05000$				
N=89 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	,0000	-,4528
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,000
Factor 2	,0000	1,0000	-,0000	,0437
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,684
Factor 3	,0000	-,0000	1,0000	-,0114
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,915
Fluxo	-,4528	,0437	-,0114	1,0000
	p=,000	p=,684	p=,915	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA SM)			
Extraction: Principal components			
(Marked loadings are $> ,700000$)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Prof	0,092376	0,594764	0,153224
TempAr	-0,508490	-0,482089	-0,272382
TempAgua	-0,941286	-0,007555	0,169443
pH	-0,930255	0,172045	-0,037622
ORP	-0,017881	-0,241267	0,952642
OD	0,349276	0,695818	0,008921
TSD	-0,792706	0,497653	0,017968
Expl.Var	2,769185	1,405843	1,035725
Prp.Totl	0,395598	0,200835	0,147961

Apêndice B.8: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Serra da Mesa.

TRÊS MARIAS

Correlations (Tabela Fluxo PA 3M)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=68 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,1501	,0558	,0717	,2535	,0657	-,1966	,1006
	p= ---	p=,222	p=,651	p=,561	p=,037	p=,594	p=,108	p=,415
Prof	-,1501	1,0000	,1416	,1352	-,0430	,3685	,3313	,0992
	p=,222	p= ---	p=,249	p=,272	p=,728	p=,002	p=,006	p=,421
TempAr	,0558	,1416	1,0000	,5906	,1506	,5313	,0302	,2272
	p=,651	p=,249	p= ---	p=,000	p=,220	p=,000	p=,807	p=,062
TempAgua	,0717	,1352	,5906	1,0000	,5153	,5413	,1479	,3019
	p=,561	p=,272	p=,000	p= ---	p=,000	p=,000	p=,229	p=,012
pH	,2535	-,0430	,1506	,5153	1,0000	,0891	-,0793	,3313
	p=,037	p=,728	p=,220	p=,000	p= ---	p=,470	p=,520	p=,006
ORP	,0657	,3685	,5313	,5413	,0891	1,0000	-,1844	,4209
	p=,594	p=,002	p=,000	p=,000	p=,470	p= ---	p=,132	p=,000
OD	-,1966	,3313	,0302	,1479	-,0793	-,1844	1,0000	,1100
	p=,108	p=,006	p=,807	p=,229	p=,520	p=,132	p= ---	p=,372
TSD	,1006	,0992	,2272	,3019	,3313	,4209	,1100	1,0000
	p=,415	p=,421	p=,062	p=,012	p=,006	p=,000	p=,372	p= ---

Correlations (Spreadsheet13)				
Marked correlations are significant at $p < ,05000$				
N=68 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	-,0000	,0000	-,1022
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,407
Factor 2	-,0000	1,0000	-,0000	-,2893
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,017
Factor 3	,0000	-,0000	1,0000	,0423
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,732
Fluxo	-,1022	-,2893	,0423	1,0000
	p=,407	p=,017	p=,732	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA 3M)			
Extraction: Principal components			
(Marked loadings are $> ,700000$)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Prof	-0,358706	0,745251	-0,132842
TempAr	-0,734504	-0,005420	-0,263241
TempAgua	-0,844194	-0,105387	0,169877
pH	-0,492844	-0,471736	0,578393
ORP	-0,783925	0,031759	-0,500197
OD	-0,092250	0,742600	0,564558
TSD	-0,598516	-0,058958	0,254918
Expl.Var	2,604995	1,345008	1,084245
Prp.Totl	0,372142	0,192144	0,154892

Apêndice B.9: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Três Marias.

TUCURUÍ

Correlations (Tabela Fluxo PA Tuc)
Marked correlations are significant at $p < ,05000$
N=72 (Casewise deletion of missing data)

Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,0166	-,0631	-,1372	-,0457	-,0509	,1809	,1539
	p= ---	p=,890	p=,598	p=,251	p=,703	p=,671	p=,128	p=,197
Prof	-,0166	1,0000	,2022	,0661	,1861	-,2674	-,0423	-,0821
	p=,890	p= ---	p=,088	p=,581	p=,118	p=,023	p=,724	p=,493
TempAr	-,0631	,2022	1,0000	,5381	,0019	,5133	,1874	-,0197
	p=,598	p=,088	p= ---	p=,000	p=,987	p=,000	p=,115	p=,870
TempAgua	-,1372	,0661	,5381	1,0000	-,3323	,2590	-,0164	-,1009
	p=,251	p=,581	p=,000	p= ---	p=,004	p=,028	p=,891	p=,399
pH	-,0457	,1861	,0019	-,3323	1,0000	-,0804	,4538	-,1727
	p=,703	p=,118	p=,987	p=,004	p= ---	p=,502	p=,000	p=,147
ORP	-,0509	-,2674	,5133	,2590	-,0804	1,0000	,2544	,0143
	p=,671	p=,023	p=,000	p=,028	p=,502	p= ---	p=,031	p=,905
OD	,1809	-,0423	,1874	-,0164	,4538	,2544	1,0000	-,4380
	p=,128	p=,724	p=,115	p=,891	p=,000	p=,031	p= ---	p=,000
TSD	,1539	-,0821	-,0197	-,1009	-,1727	,0143	-,4380	1,0000
	p=,197	p=,493	p=,870	p=,399	p=,147	p=,905	p=,000	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)
Marked correlations are significant at $p < ,05000$
N=72 (Casewise deletion of missing data)

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	,0000	,0731
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,541
Factor 2	,0000	1,0000	,0000	,0410
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,733
Factor 3	,0000	,0000	1,0000	-,0839
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,483
Fluxo	,0731	,0410	-,0839	1,0000
	p=,541	p=,733	p=,483	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Tuc)
Extraction: Principal components
(Marked loadings are $> ,700000$)

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Prof	-0,018392	0,199152	0,906268
TempAr	-0,847111	-0,108118	0,246471
TempAgua	-0,687957	-0,392644	0,285880
pH	0,038331	0,807257	0,052030
ORP	-0,728858	-0,124017	-0,456055
OD	-0,437348	0,743666	-0,243676
TSD	0,265896	-0,579701	-0,070838
Expl. Var	1,985896	1,761656	1,238886
Prp. Totl	0,283699	0,251665	0,176984

Apêndice B.10: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Tucuruí.

XINGÓ

Correlations (Tabela Fluxo PA Xin)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=50 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,0117	-,0293	,2624	,2407	-,3455	,0194	,1196
	p= ---	p=,936	p=,840	p=,066	p=,092	p=,014	p=,894	p=,408
Prof	-,0117	1,0000	-,1114	-,4851	,3775	,2835	-,4211	,4666
	p=,936	p= ---	p=,441	p=,000	p=,007	p=,046	p=,002	p=,001
TempAr	-,0293	-,1114	1,0000	,5536	-,0357	-,2043	,5222	,0056
	p=,840	p=,441	p= ---	p=,000	p=,805	p=,155	p=,000	p=,969
TempAgua	,2624	-,4851	,5536	1,0000	-,1828	-,5368	,7002	-,0331
	p=,066	p=,000	p=,000	p= ---	p=,204	p=,000	p=,000	p=,819
pH	,2407	,3775	-,0357	-,1828	1,0000	-,0520	,0625	,6226
	p=,092	p=,007	p=,805	p=,204	p= ---	p=,720	p=,666	p=,000
ORP	-,3455	,2835	-,2043	-,5368	-,0520	1,0000	-,4520	,2183
	p=,014	p=,046	p=,155	p=,000	p=,720	p= ---	p=,001	p=,128
OD	,0194	-,4211	,5222	,7002	,0625	-,4520	1,0000	,0599
	p=,894	p=,002	p=,000	p=,000	p=,666	p=,001	p= ---	p=,680
TSD	,1196	,4666	,0056	-,0331	,6226	,2183	,0599	1,0000
	p=,408	p=,001	p=,969	p=,819	p=,000	p=,128	p=,680	p= ---

Correlations (Spreadsheet4)			
Marked correlations are significant at $p < ,05000$			
N=50 (Casewise deletion of missing data)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Fluxo
Factor 1	1,0000	,0000	,1207
	p= ---	p=1,00	p=,404
Factor 2	,0000	1,0000	,2126
	p=1,00	p= ---	p=,138
Fluxo	,1207	,2126	1,0000
	p=,404	p=,138	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Xin)			
Extraction: Principal components			
(Marked loadings are $> ,700000$)			
Variable	Factor 1	Factor 2	
Prof	-,689650	0,407696	
TempAr	0,600243	0,350445	
TempAgua	0,878488	0,216062	
pH	-,306601	0,791733	
ORP	-,647454	-,138261	
OD	0,790784	0,396786	
TSD	-,339728	0,822822	
Expl.Var	2,861606	1,816142	
Prp.Totl	0,408801	0,259449	

Apêndice B.11: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para Xingó.

TODAS HIDRELÉTRICAS

Correlations (Tabela Fluxo PA Hidrelétricas)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=662 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Fluxo	Prof	TempAr	TempAgua	pH	ORP	OD	TSD
Fluxo	1,0000	-,2104	-,0141	-,0413	-,1969	,0461	,0103	-,2112
	p= ---	p=,000	p=,716	p=,289	p=,000	p=,236	p=,791	p=,000
Prof	-,2104	1,0000	,1264	,1561	,2877	-,1938	,1401	,2903
	p=,000	p= ---	p=,001	p=,000	p=,000	p=,000	p=,000	p=,000
TempAr	-,0141	,1264	1,0000	,8427	,1363	-,0853	-,1052	,2425
	p=,716	p=,001	p= ---	p=0,00	p=,000	p=,028	p=,007	p=,000
TempAgua	-,0413	,1561	,8427	1,0000	,1546	-,1018	-,0456	,2144
	p=,289	p=,000	p=0,00	p= ---	p=,000	p=,009	p=,241	p=,000
pH	-,1969	,2877	,1363	,1546	1,0000	-,4251	,0797	,4863
	p=,000	p=,000	p=,000	p=,000	p= ---	p=0,00	p=,040	p=0,00
ORP	,0461	-,1938	-,0853	-,1018	-,4251	1,0000	,0782	-,3654
	p=,236	p=,000	p=,028	p=,009	p=0,00	p= ---	p=,044	p=0,00
OD	,0103	,1401	-,1052	-,0456	,0797	,0782	1,0000	,0223
	p=,791	p=,000	p=,007	p=,241	p=,040	p=,044	p= ---	p=,567
TSD	-,2112	,2903	,2425	,2144	,4863	-,3654	,0223	1,0000
	p=,000	p=,000	p=,000	p=,000	p=0,00	p=0,00	p=,567	p= ---

Correlations (Spreadsheet20)				
Marked correlations are significant at $p < ,05000$				
N=662 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Fluxo
Factor 1	1,0000	-,0000	-,0000	,1854
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,000
Factor 2	-,0000	1,0000	-,0000	-,1314
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,001
Factor 3	-,0000	-,0000	1,0000	,0269
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,489
Fluxo	,1854	-,1314	,0269	1,0000
	p=,000	p=,001	p=,489	p= ---

Factor Loadings (Unrotated) (Tabela Fluxo PA Hidrelétricas)			
Extraction: Principal components			
(Marked loadings are $> ,700000$)			
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Prof	-,494751	0,300022	-,378920
TempAr	-,680237	-,0672084	-,069165
TempAgua	-,687254	-,0648596	-,130923
pH	-,654714	0,465556	0,064175
ORP	0,544245	-,0420716	-,0407081
OD	0,006069	0,285119	-,856684
TSD	-,698633	0,318396	0,079768
Expl.Var	2,392797	1,538801	1,075609
Prp.Totl	0,341828	0,219829	0,153658

Apêndice B.12: Teste de correlação entre fluxo e parâmetros ambientais utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson (acima), resultado da Análise de Componentes Principais (abaixo, esquerda) e fatores que compõem a componente principal (abaixo, direita) para todas as hidrelétricas.

APÊNDICE C

BATALHA

Tabela C.1 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Batalha baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4	
	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA
SMC30	x	x	x	x	x	x	12	11
SMC20	x	x	x	x	x	x	x	x
CTL20	x	x	x	x	x	x	x	x
CTL20 Foz	x	x	x	x	x	x	x	x
TEX20	x	x	x	x	x	x	27	24
FIR20	x	x	x	x	x	x	35	18
SMC70	x	x	x	x	x	x	x	x
JAB20	x	x	x	x	x	x	x	x
SMC80	x	x	x	x	x	x	x	x
SMC90	x	x	x	x	x	x	x	x
SMC100	x	x	x	x	x	x	x	x
JUS01	x	x	x	x	x	x	x	x
SMC40	x	x	x	x	x	x	26	17

BELO MONTE

Tabela C.2 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Belo Monte baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4	
	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA
RX03	x	x	71	28	9	10	75	41
IGLH	x	x	11	5	38	15	7	3
RX24	x	x	35	7	13	6	105	20
RX18	x	x	46	22	152	17	7	6
RX20	x	x	40	38	-646	43	53	12
RX01	x	x	86	10	157	26	42	13
RX02	x	x	22	16	208	45	45	22
IDM	x	x	11	17	27	20	x	x
AMB	x	x	11	8	26	15	x	x
RX19	x	x	x	x	x	x	x	x

BALBINA

Tabela C.3 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Balbina baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4	
	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA
M3	x	x	15	39	x	x	x	x
M2	x	x	3	14	x	x	3	3
M1	x	x	-143	22	9	20	4	11
M1A	x	x	18	17	2	2	3	4
M4	x	x	x	x	4	5	x	x
M2A	x	x	x	x	3	6	x	x

ITAIPU

Tabela C.4 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Itaipu baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4		Campanha 5	
	Orig	CAA								
E11	x	x	-29	54	-13	17	x	x	x	x
E14	x	x	11	6	x	x	x	x	x	x
E20	x	x	6	4	x	x	29	24	x	x
E13	x	x	131	13	-41	47	304	25	x	x
E12	x	x	-78	32	-69	55	-375	29	x	x
E07	x	x	143	40	x	x	x	x	x	x
E03	x	x	20	13	x	x	46	19	x	x
E01	x	x	-78	19	x	x	x	x	x	x
E05	x	x	x	x	-4	21	x	x	x	x
E08	x	x	x	x	-70	7	164	22	x	x
E02	x	x	x	x	-242	50	46	18	x	x
E16	x	x	x	x	x	x	27	16	x	x
E06	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
E15	x	x	x	x	x	x	x	x	-19	18
T1	x	x	x	x	x	x	x	x	-31	51
T2	x	x	x	x	x	x	x	x	-28	62
T3	x	x	x	x	x	x	x	x	-6	13
T4	x	x	x	x	x	x	x	x	-37	86
T5	x	x	x	x	x	x	x	x	-31	34

SEGREDO

Tabela C.5 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Segredo baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4	
	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA
S1	x	x	52	7	x	x	385	24
ES01	x	x	-27	32	x	x	-24	29
E3	x	x	-1	2	x	x	-27	52
E2	x	x	-26	18	87	19	-36	27
S3	x	x	71	18	-232	15	-69	59
S2	x	x	54	22	31	9	-70	28
E4	x	x	x	x	x	x	x	x
E1	x	x	x	x	x	x	x	x

SERRA DA MESA

Tabela C.6 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Serra da Mesa baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4		
	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	Trat	CAA
MON 01	x	x	x	x	x	x	26		8
ES 01	x	x	x	x	x	x	x		x
TO 01	x	x	x	x	x	x	20		6
BA 01	x	x	x	x	x	x	x		x
BA 02	x	x	x	x	x	x	x		x
MA 01	x	x	x	x	x	x	x		x
TR 01	x	x	x	x	x	x	9		11
PA 01	x	x	x	x	x	x	15		9
MA 02	x	x	x	x	x	x	x		x
ML 01	x	x	x	x	x	x	x		x

TUCURUÍ

Tabela C.7 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Tucuruí baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4	
	Orig	CAA	Orig	Trat	CAA	Orig	Trat	CAA
MBB	x	x	x	x	x	x	26	9
M1	x	x	x	x	x	x	106	13
C2	x	x	x	x	x	x	247	20
C1	x	x	x	x	x	x	-610	17
JT	x	x	x	x	x	x	11	9
M5	x	x	x	x	x	x	x	x
MR	x	x	x	x	x	x	10	21
MP	x	x	x	x	x	x	x	x
MBL	x	x	x	x	x	x	x	x
M3	x	x	x	x	x	x	40	30

XINGÓ

Tabela C.8 – Valores de constante de troca gasosa (k , em cm h^{-1}) para Xingó baseadas nos dados originais (Orig) e com correção do ar ambiente (CAA).

Ponto	Campanha 1		Campanha 2		Campanha 3		Campanha 4		
	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	CAA	Orig	Trat	CAA
X11	x	x	3	16	-201	117	143		91
X09	-288	23	-50	35	-75	26	13		27
X08	x	x	2936	33	-407	24	7		7
X02	40	20	x	x	x	x	x		x
X03	-179	33	30	16	x	x	x		x
X04	-45	46	-534	42	-73	13	30		22
X05	-70	13	-66	32	-39	20	64		42
X06	125	17	-932	66	98	8	203		58
X07	196	50	30	34	-21	58	33		20
X10	75	44	x	x	184	39	22		96

Tabela C.9 – Média da constante de troca gasosa corrigida (k , em cm h^{-1}) para cada ponto considerando os valores de todas as campanhas. Os códigos que definem cada ponto se referem à nomenclatura adotada para diferenciá-los durante as campanhas de coleta de dados.

BATALHA											
<i>Pontos</i>	SMC30		TEX20			FIR20		SMC40			
<i>k</i>	11		24			18		17			
BELO MONTE											
<i>Pontos</i>	RX03	IGLH	RX24	RX18	RX20	RX01	RX02	IDM	AMB		
<i>k</i>	26	8	11	15	31	16	28	18	12		
BALBINA											
<i>Pontos</i>	M3		M2		M1		M1A		M4	M2A	
<i>k</i>	39		8		18		8		5	6	
ITAIPU											
<i>Pontos</i>	E11	E14	E20	E13	E12	E7	E3	E1	E5		
<i>k</i>	36	6	14	28	39	40	16	19	21		
<i>Pontos</i>	E8	E2	E16	E15	T1	T2	T3	T4	T5		
<i>k</i>	15	34	16	18	51	62	13	86	34		
SEGREDO											
<i>Pontos</i>	S1		ES01		E3		E2		S3	S2	
<i>k</i>	15		30		27		21		31	20	
SERRA DA MESA											
<i>Pontos</i>	MON1			TO1		TR1		PA1			
<i>k</i>	8			6		11		9			
TUCURUÍ											
<i>Pontos</i>	MBB		M1		C2		C1		JT	MR	M3
<i>k</i>	9		13		20		17		9	21	30
XINGÓ											
<i>Pontos</i>	X11	X9	X8	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X10	
<i>k</i>	75	28	21	20	25	31	27	37	41	60	