UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Cristiano Maboni

FLUXO DE METANO NA ATMOSFERA SOBRE UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL

Santa Maria, RS
2016

Cristiano Maboni

FLUXO DE METANO NA ATMOSFERA SOBRE UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e Suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Física**.

ORIENTADORA: Prof.ª Débora Regina Roberti

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática
da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Maboni, Cristiano
FLUXO DE METANO NA ATMOSFERA SOBRE UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL / Cristiano Maboni.- 2015.
67 p.; 30 cm

Orientadora: Débora Regina Roberti
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, RS, 2015

1. Metano 2. Arroz irrigado 3. Fluxos turbulentos I. Roberti, Débora Regina II. Título.

©2016
Todos os direitos autorais reservados a Cristiano Maboni. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
End. Eletr.: cristianomaboni@hotmail.com

Cristiano Maboni

FLUXO DE METANO NA ATMOSFERA SOBRE UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e Suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Física**.

Aprovado em 10 de agosto de 2016:

Débora Regina Roberti

Débora Regina Roberti, Dr.a. (UFSM)
(Presidenta/Orientadora)

Leonardo J. G. Aguiar

Leonardo José Gonçalves Aguiar, D.r. (UFPel)

Janaina Viário Carneiro

Janaina Viário Carneiro, Dr.a. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2016

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

À Júlia Jost Beras minha companheira de todas as horas, por ter compreendido e me apoiado em todos os momentos.

Aos meus pais Jorge Maboni e Marli N.L. Maboni por terem me dado a vida e esculpido meu carrater e aos meus irmãos André e Andréa por terem compartilhado os melhores momentos da vida.

À professora Dr. Débora Regina Roberti pela orientação, dedicação, paciência e estímulo em sua orientação e pela amizade.

A todos os professores do Departamento de Física da UFSM.

Aos meus colegas do Laboratório de Micrometeorologia em especial ao Daniel Michelon dos Santos, Hans Rogério Zimermann, Claudio Alberto Teichrieb, Pablo Eli Soares de Oliveira, Vanessa de Arruda Souza, Marcelo Diaz, Lucas Augusto Fagundes, Josué Miguel Sehnem e a todos que de maneira direta ou indireta contribuiram para a realização deste trabalho.

À família Cassol, pela disponibilização da área de estudo e dos auxílios prestados.

A UFSM, pela oportunidade de estudo e utilização de suas instalações.

Ao INPE pela utilização de suas instalações.

A CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

Perguntaram ao Dalai Lama: - O que mais te surpreende na Humanidade? E ele respondeu: - Os homens... Porque perdem a saúde para juntar dinheiro, depois perdem dinheiro para recuperar a saúde. E por pensarem ansiosamente no futuro, esquecem do presente de tal forma que acabam por não viver nem o presente nem o futuro. E vivem como se nunca fossem morrer... e morrem como se nunca tivessem vivido.

(Dalai Lama)

RESUMO

FLUXO DE METANO NA ATMOSFERA SOBRE UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL

AUTOR: Cristiano Maboni
ORIENTADORA: Débora Regina Roberti

A produção de arroz irrigado por inundação é responsável por 12-26% de toda a emissão antropogênica de CH_4 do mundo. O Brasil é um dos principais produtores de arroz irrigado por inundação. O objetivo deste estudo é compreender a dinâmica das trocas de metano entre o arroz irrigado por alagamento e a atmosfera no sul do Brasil. São utilizadas duas técnicas de estimativa de fluxos superficiais: *Eddy Covariance* e câmara de solo. Os dados foram obtidos sobre uma lavoura de arroz irrigado por inundação no município de Cachoeira do Sul. A emissão total de metano no arroz irrigado na safra de 2015-2016 (14 de novembro de 2015 a 16 de abril de 2016) foi de 35,7 gCH_4m^{-2}. A radiação solar é o forçante meteorológico que mostrou maior correlação com o fluxo de metano.

Palavras-chave: Metano. Arroz irrigado. Fluxos turbulentos.

ABSTRACT

METHANE FLOW IN THE ATMOSPHERE OVER AN IRRIGATED RICE BY FLOODING

AUTHOR: Cristiano Maboni
ADVISOR: Débora Regina Roberti

The rice paddy is responsible for 12-16% of the anthropogenic emission of CH_4 in the world. Brazil is one of most important rice paddy producer. The goal of this study is to understand the dynamics of methane exchange between rice paddy and the atmosphere in the south of Brazil. Two estimation techniques are used: eddy covariance and soil chamber. Data were obtained in a rice paddy farm in Cachoeira do Sul municipality. The total emission of methane in 2015-2016 rice paddy growing season (November 14, 2015 to April 16 2016) was 35.7 gCH_4m^{-2}. The solar radiation is the weather forcing that showed a higher correlation with methane emissions.

Keywords: Methane. Irrigated rice. Turbulent flows.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapeamento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul-Safra 2013-2014 17
Figura 2.1 – Representação do balanço radiativo na atmosfera 22
Figura 2.2 – Processo de produção, oxidação e emissão de metano em solos alagados. 24
Figura 2.3 – Modos de vibrações para moléculas simples. 34
Figura 2.4 – Ilustração da decomposição de Reynolds. 35
Figura 2.5 – Ilustração do método da câmara de solo fechada. 36
Figura 3.1 – Localização do sítio experimental (CS): (A) Região Sul do Brasil, (B) Localização do sítio experimental no município de Cachoeira do Sul-RS, (C) inundação por parcelas entre canais de drenagem e (D) localização da torre vista da sede da fazenda. 39
Figura 3.2 – Visão do anoemômetro sônico e dos analizadores de gás para o sistema *eddy covariance* 40
Figura 3.3 – Foto das câmaras de solo instaladas no sítio experimental de Cachoeira do Sul na safra 2015-2016. Na esquerda, câmara sob solo nu, na direita câmara com plantas. 44
Figura 4.1 – Média diária das variáveis meteorológicas no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de Abril de 2016. (a) Temperatura do ar (Temp), (b) deficit de pressão de vapor (VPD) e (c) radiação global (Rg) no quadro inferior. 46
Figura 4.2 – Precipitação diária no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 01 de outubro de 2014 a 30 de Abril de 2016. 47
Figura 4.3 – (a) Troca Líquida do Ecossistema (NEE), (b) Concentração de CO_2 e (c) Respiração do Ecossistema (Reco) no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de abril de 2016. As linhas verticais pontilhadas representam o início e o fim das safras. 48
Figura 4.4 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas hachuradas representam as safras de arroz. ... 49
Figura 4.5 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas hachuradas representam as safras de arroz. 50
Figura 4.6 – Média diária das variáveis: (a) fluxo de metano e (b) concentração de metano no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016. 51
Figura 4.7 – Fluxo de Metano e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016. 52
Figura 4.8 – Fluxo de Metano e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016. 53
Figura 4.9 – Ciclo diurno no período de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016 das variáveis: (a) fluxo de metano (CH_4 Fluxo), (b) respiração do ecossistema (Reco), (c) concentração de metano (CH_4) e (d) concentração de dióxido de carbono (CO_2) no sítio experimental de Cachoeira do Sul. ... 54
Figura 4.10 – Ciclo diurno no período de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de

2016 das variáveis: (a) fluxo de metano (CH_4 Fluxo), (b) respiração do ecossistema (Reco)e (c) temperatura do ar (Temp) no sítio experimental de Cachoeira do Sul. 55
Figura 4.11 – Média diária obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. a) respiração do solo na safra 2014-2015; b) respiração do solo na safra 2015-2016. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C_solo representa o valor na câmara sobre solo nu; C_médio representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC 57
Figura 4.12 – Média diária obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. a) fluxo de metano na safra 2014-2015; b) fluxo de metano na safra 2015-2016. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C_solo representa o valor na câmara sobre solo nu; C_médio representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC 58
Figura 4.13 – Integração sazonal do fluxo de metano através da câmara de solo (CH4 arroz) e *eddy covariance* (CH4 EC) no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de janeiro de 2015 á 14 de abril de 2016. 59
Figura 4.14 – Representação da estatística entre o fluxo de metano e as variáveis: Temp, VPD, Rg, Rn e Reco no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016. 60
Figura 4.15 – Representação da estatística entre o fluxo de Metano e as variáveis: Temp, VPD, Rg e Reco no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016. 61
Figura 4.16 – Representação da estatística entre o fluxo de Metano e as variáveis: Temp, VPD, Rg e Reco no sítio experimental de Cachoeira do Sul para o período de dossel fechado. 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Associação de bandas eletromagnéticas com diferentes transições. 29
Tabela 2.2 – Estrutura molecular e seus momentos de inércias. 31
Tabela 3.1 – Limites do sítio experimental de Cachoeira do Sul (CS) 41

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparação ente translação e rotação. 30
Quadro 3.1 – Configuração da torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul (CS). . . 42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Atmosfera Livre
CF_3Cl	clorotrifluorometano
CH_2O	Metanal
CH_3	Metila
CH_4	Metano
CH_3O_2	Metildioxidanyl
Cl	Cloro
CO_2	Dióxido de Carbono
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLP	Camada Limite Planetária
CLS	Camada Limite Superficial
CM	Camada de Mistura
CR	Camada Residual
CS	Cachoeira do Sul
EC	Método de Eddy Covariance
EUA	Estados Unidos da América
GEE	Gás de Efeito Estufa
GPP	Produção Primária Bruta
HCO	Butanodial
H_2O	Água
LWR	Radiação de Onda Longa
N_2	Nitrogênio
NEE	Troca Líquida do Ecossistema
NH_3	Amônia
N_2O	Óxido Nitroso
O_2	Oxigênio

O_3	Ozônio
OH	Hidroxila
OHS	Oscilador Harmônico Simples
PH	Potencial Hidrogeniônico
$Reco$	Respiração
RS	Rio Grande do Sul
RF	Forçante Radioativa
SWR	Radiação de Onda Curta
Tg	Teragrama

LISTA DE SÍMBOLOS

S	$\downarrow$ Onda curta incidente
S	$\uparrow$ Onda curta refletida
L	$\downarrow$ Onda longo incidente
L	$\uparrow$ Onda longa refletida
E	Energia
Δ	Varação
$\lvert\Delta E\rvert$	Módulo da variação da energia
λ	Comprimento de onda
v	Velocidade
h	Constante de Planck
R_H	Constante de Rydberg para o hidrogênio
R_n	Constante de Rydberg para átomo em questão
K	Energia cinética
U	Energia potencial
m	Massa
m'	Massa reduzida
Z	Número atômico
e	Carga elementar do elétron
ϵ_0	Constante de permissividade da luz no vácuo
r_n	Raio da órbita do elétron
n	órbita do elétron
c	Velocidade da luz no vácuo
F	Força
a	Aceleração
I	Momento de inércia
τ	Torque
ω	Velocidade angular

p	Momento linear
L	Momento angular
α	Aceleração angular
$\sum_i$	Somatório em "i"
j	Número quântico rotacional
k	constante elástica
ϑ	Número quântico vibracional
F_Q	Fluxo turbulento de determinado escalar
Q	Rasão de mistura de determinado escalar
ρ_a	Densidade do ar
w	Componente vertical do vento
N	Número de modos normais
μ	Micro = 1×10^{-6}
π	Pi = 3,14159

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **15**
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **19**
2.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP) 19
2.1.1 Camada limite convectiva (CLC) **20**
2.1.2 Camada limite estável (CLE) **20**
2.1.3 Camada residual (CR) **21**
2.2 BALANÇO RADIATIVO 21
2.3 O METANO NA ATMOSFERA 22
2.4 ABSORÇÃO MOLECULAR 25
2.4.1 Base para absorção/emissão atômica **25**
2.4.2 Base para absorção/emissão molecular **27**
2.4.3 Linha de absorção e emissão **28**
2.4.4 Transições rotacionais **29**
2.4.5 Quantização do momento angular e espectro de absorção rotacional **31**
2.4.6 Transição vibracional **32**
2.5 MEDIDA DA EMISSÃO SUPERFICIAL DE GEE 34
2.5.1 Método dos fluxos turbulentos: técnicas *eddy covariance* **34**
2.5.2 Método da câmara de solo **36**
3 METODOLOGIA **38**
3.1 ÁREA DE ESTUDO 38
3.2 MEDIDAS EM TORRE MICROMETEOROLÓGICA 41
3.3 PROCESSAMENTO DE DADOS 43
3.3.1 Sensores atmosféricos **43**
3.3.2 Câmara de solo **44**
3.4 ANÁLISE DOS DADOS 45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES **46**
4.1 CONDIÇÕES AMBIENTAIS 46
4.2 FLUXOS ATMOSFÉRICOS 48
4.2.1 Dióxido de Carbono **48**
4.2.2 Emissões de Metano **50**
4.2.3 Ciclo diurno **53**
4.3 COMPARAÇÕES DAS EMISSÕES DO ECOSSISTEMA: CÂMARA E TORRE. .. 55
4.4 MECANISMOS QUE CONTROLAM AS EMISSÕES DE METANO 59
5 CONCLUSÃO **63**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **64**
ANEXO A – METANO E OUTROS GASES DE EFEITO ESTUFA **67**

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, a agricultura foi e continua sendo o setor fundamental para a manutenção e sobrevivência de muitas civilizações. De forma direta e/ou indireta, é dela que sai boa parte dos *commodities* responsáveis pela movimentação econômica ao redor do mundo. Pode-se citar como exemplos, o algodão: responsável pela elaboração de vestimentas e agasalhos; o milho, a soja e o sorgo: matérias-primas para rações animais, permitindo a produção das mais importantes fontes de proteínas como a carne, ovos, leite e seus derivados. Ainda há de se citar as frutas, hortaliças, e grãos, como o arroz e o feijão, que contribuem como parte imprescindível da alimentação humana. A máquina que impulsiona essa cadeia é a geração de emprego tanto no campo quanto nas indústrias fabricantes de maquinários agrícolas, caminhões utilizados no escoamento da produção, no armazenamento e processamento desses *commodities* e sem contar o desenvolvimento de tecnologias que ajudam a otimizar as propriedades afim de promover aumento de produtividade sem a necessidade de abrir novas lavouras que invadiriam ecossistemas naturais.

A busca por comodidade, rentabilidade, qualidade, redução das perdas e uma maior produtividade do campo, fez com que os produtores rurais buscassem aperfeiçoar seus trabalhos e começassem a fazer uso de novas técnicas de preparo do solo, adubação, plantio, produtos químicos, irrigação, melhoramento genético entre outros. Junto com os benefícios que a evolução trouxe para a agricultura e a sociedade como um todo, surge a agricultura na forma de monocultura que vem causando graves interferências ambientais, promovendo um desequilíbrio nos ecossistemas em escalas assustadoras (TILMAN, 1999).

Não se pode culpar um único setor (neste caso, o setor primário) pelos danos cometidos ao meio ambiente, mas devemos compreender que qualquer atividade humana resulta de alguma forma, em algum tipo de desequilíbrio no sistema. Um desses desequilíbrios em que vem sendo bastante debatido ao longo das últimas décadas é a intensificação do efeito estufa, também conhecido por aquecimento global.

A Terra está envolta por um gigantesco oceano de gases, a atmosfera. Esta apresenta em sua composição, mais de 99,96% é particionada em nitrogênio (78,084%), oxigênio (20,948%), argônio (0,934%) e vapor de água (0-0,04% - variável) (LIOU, 2002) . Mesmo de caráter supostamente imutável, a atmosfera é um sistema dinâmico e que está em constante alteração decorrente de processos físicos e químicos. Esses processos, também chamados de ciclo dos gases, que compõe menos de 1% , são decorrentes da interação que a mesma tem com o solo, gelo, lagos, oceanos, plantas, radiação solar, animais, pessoas, bactérias, entre outros (MORAES, 2010). São nessas interações que os gases são formados e/ou removidos. Dependendo da eficiência do processo de remoção, uma molécula de gás pode ter um tempo de vida útil variando de segundos a milhões de

anos (WALLACE; HOBBS, 2006).

A presença de alguns gases na atmosfera cria um fenômeno físico-químico denominado efeito estufa. Esse fenômeno ocorre de forma natural, retendo parte da energia fornecida pelo Sol, fazendo com que a temperatura média na superfície terrestre permaneça no que está hoje. Isso possibilita a existência de vida na Terra com a forma em que conhecemos hoje, do contrário, a temperatura de equilíbrio do sistema terra atmosfera estaria próximo de -18 $^{\circ}\mathrm{C}$ (LIOU, 2002).

Esses gases existem na atmosfera de forma natural, porém, o que vem preocupando é a emissão antropogênica a qual é o principal responsável pela intensificação desse fenômeno, como destaca o IPCC (2013, p.5): "cada uma das três últimas décadas têm sido sucessivamente mais quente na superfície da Terra do que qualquer década anterior desde 1850". Só as emissões antropogênicas de metano (CH_4) foram responsáveis pelo aumento da forçante radioativa (RF) em 0,97 Wm^{-2} em 2011 em relação a 1750 (IPCC, 2013). Nas emissões antropogênicas, o metano (CH_4) é o segundo gás mais importante no efeito estufa, antecedido pelo dióxido de carbono (CO_2),com um potencial de aquecimento global (PAG) 23 vezes superior na retenção de radiação na atmosfera em relação ao (CO_2) (IPCC, 2007).

A produção de arroz irrigado por inundação é responsável por 12-26% de toda a emissão antropogênica de CH_4 do mundo (CARMELITA et al., 2014). Até 2009 os arrozais eram responsáveis por emitir cerca de 30–40 $TgCH_4$ por ano, sendo a Ásia tropical responsável por 90% dessa emissão (IPCC, 2013).

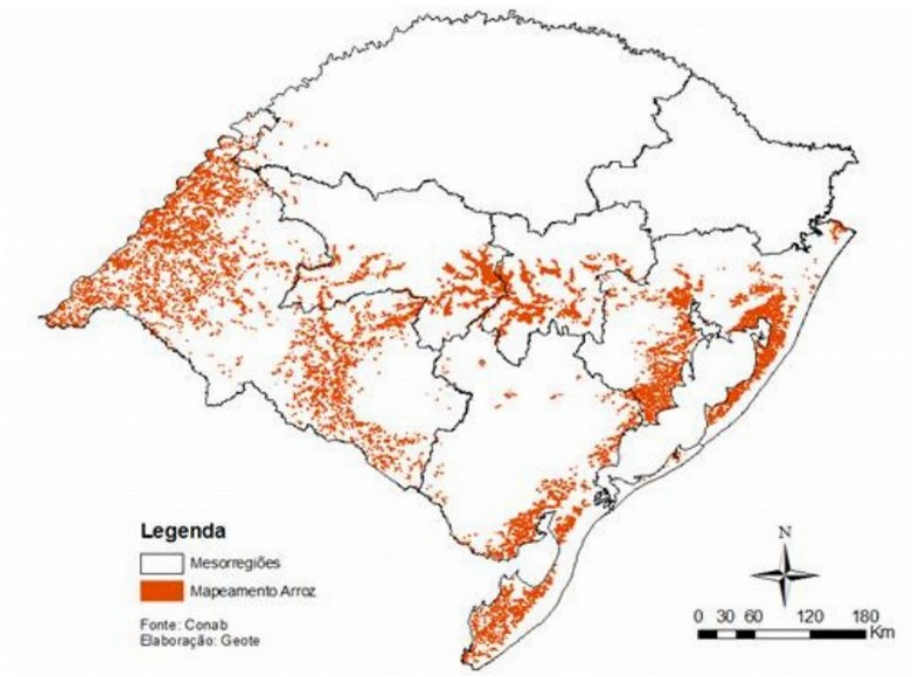
Pesquisas realizadas pela CONAB (2014) utilizando dados estatísticos de produção e mapeamento de lavouras via satélite (Figura 1.1), demonstram que o Estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz irrigado do Brasil.

A importância em quantificar as taxas de emissões e absorções dos gases do efeito estufa (GEE) de fontes em diferentes partes do planeta se dá pela necessidade em identificar e entender os processos que geram esses gases e principalmente os fatores controladores (BALDOCCHI et al., 2001). Essa quantificação demanda equipamentos capazes de realizar medidas contínuas e precisas (TEICHRIEB, 2012).

São destacadas três técnicas independentes entre si e extensamente utilizadas para quantificar em diferentes escalas espaciais as trocas dos gases do efeito estufa (GEE) entre a superfície e a atmosfera: método da câmara de solo, método de Covariância dos Vórtices (do inglês, *Eddy Covariance*) e cálculos baseados em equações de difusão no solo/ar e interfaces água/ar (SCHRIER-UIJL et al., 2010; BALDOCCHI et al., 2001).

A utilização do método de Covariância dos Vórtices Turbulentos traz vantagens sobre a câmara de solo por possibilitar a realização das medições a longo prazo, de forma contínua, representando ecossistemas ou culturas agrícolas que abrangem grandes áreas sem interferir na dinâmica das trocas gasosas entre a fonte de emissão e a atmosfera (BALDOCCHI; HINCKS; MEYERS, 1988; BALDOCCHI et al., 2012; CARMELITA et al.,

Figura 1.1 – Mapeamento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul-Safra 2013-2014



Fonte: (CONAB, 2015, p. 106).

2014). Porém, essa técnica requer algumas exigências em sua aplicabilidade, como terreno plano, homogêneo e horizontal (CARMELITA et al., 2014; BALDOCCHI et al., 2012; SCHRIER-UIJL et al., 2010; OLIVEIRA, 2011).

Um dosproblemas no uso do método *Eddy Covariance* está em realizar os cálculos nos períodos noturnos, momento em que a turbulência geralmente diminui consideravelmente (AUBINET, 2008). Para esses períodos, o vento fraco combinado com o terreno inclinado e não homogêneos pode acarretar em uma subestimativa dos fluxos (OLIVEIRA, 2011). Diversas técnicas de filtragem e preenchimento de dados nestas situações têm sido apresentadas (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012).

No caso específico do metano emitido em áreas de arroz irrigado por inundação, a taxa de emissão média global é de aproximadamente 0,12 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ (IPCC, 2007). Medidas realizadas no Brasil, com diferentes técnicas a partir de dados de solo, mostram taxas de emissão de 0,047 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ até 1,18 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ (LIMA; PESSOA; LIGO, 2002; SILVA; GRIEBELER; FREIRE, 2011). Esta discrepância também é encontrada em diferentes regiões da Ásia (TSENG et al., 2010). Ainda são poucos os trabalhos sobre a estimativa da taxa de emissão de metano em áreas de arroz irrigado por inundação no Brasil. Além disso, as medidas realizadas através de análises de solo, cromatografia ou câmara estática são pontuais no tempo e espaço e podem não capturar a dinâmica dos fluxos de metano em diferentes escalas de tempo. Estas técnicas podem perturbar a integridade da superfície do solo, causando uma superestimativa ou subestimativa do fluxo. Uma alterna-

tiva é a técnica de covariância de vórtices *Eddy Covariance*, que permite realizar estimativas dos fluxos turbulentos através de medidas de alta frequência de variáveis atmosféricas sem causar perturbação no ambiente (BALDOCCHI; HINCKS; MEYERS, 1988).

O objetivo deste estudo é compreender a dinâmica das trocas de metano entre o arroz irrigado por alagamento e a atmosfera em uma lavoura de arroz irrigado no Sul do Brasil. Para este estudo foram utilizadas duas técnicas de estimativa de fluxos superficiais: *Eddy Covariance* e Câmara de solo. Os dados foram obtidos sobre uma lavoura de arroz irrigado por inundação no município de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 á 30 de abril de 2016. As questões que esse trabalho pretende resolver são: (1) Qual a emissão total de metano num cultivo de arroz irrigado por inundação num clima subtropical do Brasil; (2) Qual a relação entre medidas atmosféricas e de solo das emissões de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação num clima subtropical do Brasil; (3) Quais os mecanismos que podem aumentar ou diminuir as emissões de CH4 em arroz irrigado por inundação em um clima subtropical do Brasil.

Essa dissertação esta estruturada em mais três capítulos seguintes: uma fundamentação teórica (Capítulo 2) descrevendo a atuação dos gases do efeito estufa na atmosfera e descrevendo os métodos de estimativa dos fluxos superficiais utilizados nesse trabalho; apresentação dos resultados e análise dos mesmos (Capítulo 3), a fim de responder as questões científicas desse trabalho; e por fim a conclusão (Capítulo 4)

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de emissão, absorção ou dispersão dos gases do efeito estufa (GEE) entre a superfície e a atmosfera não é de simples entendimento visto que a atmosfera possui movimentos que variam em escalas que se estendem de alguns milímetros até a profundidade da própria atmosfera, devido a interação de forças fundamentais da natureza. As trocas destes gases se dá pela presença de turbulência em uma região particular da atmosfera denominada de Camada Limite Planetária (CLP). A CLP é a região da atmosfera mais próxima da superfície da Terra que responde diretamente ao ciclo diurno da radiação solar (STULL, 1988). Neste capítulo vamos abordar a representação física da CLP e do balanço radiativo, para em seguida descrever como ocorrem as interações entre os gases do efeito estufa e a radiação na atmosfera. A fundamentação teórica dos métodos utilizados neste trabalho para a estimativa da emissão de metano e dióxido de carbono também será apresentada.

2.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP)

A atmosfera é estavelmente estratificada sendo dividida em 4 camadas principais de acordo com a variação da temperatura, altura e concentração de gases: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera/Ionosfera (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001; STULL, 1988).

Dentre essas quatro camadas destaca-se a troposfera, camada mais baixa da atmosfera. Com três quartos do peso de toda a atmosfera, a troposfera ocorre da superfície terrestre até 8 a 18 km de altitude dependendo da latitude e da época do ano, tornando-a mais importante para todos os seres vivos e para os fenômenos meteorológicos que definem o tempo e clima (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001).

Incorporado a troposfera estão outras duas subdivisões: a Camada Limite Planetária (CLP) e a Atmosfera Livre (AL). Para períodos bem destintos (vento fraco no interior da CLP, ausência de nuvens entre outros fatores), pode-se observar a delimitação entre o topo da CLP e a AL através da existência de um efeito tampão na atmosfera que limita a dispersão de poluentes. Esse efeito é observado em emissões de fumaça por chaminés de grande porte (MORAES, 2010). Na região da AL predomina um escoamento linear devido a pouca influência do aquecimento e resfriamento da superfície e dos efeitos da rugosidade (STULL, 1988).

A dispersão de poluentes emitidos por fontes antropogênicas ocorrem na região da Camada Limite Planetária (CLP) que sofre uma influência direta da superfície e responde aos forçantes térmicos decorrentes do aquecimento e resfriamento da superfície e de for-

çantes mecânicos, devido ao cisalhamento do vento causado pelo atrito com a superfície. Caracterizada por sua natureza turbulenta, a CLP varia no tempo e no espaço sob a ação desses forçantes em uma escala de tempo de uma hora ou menos, atingindo assim algumas dezenas de metros de altura no período da noite à alguns quilômetros no período do dia (STULL, 1988; MORAES, 2010).

Assim como a CLP varia sua altura entre o dia e a noite, ela também muda de acordo com a estação do ano para uma mesma região e o mesmo ocorre para períodos iguais porém entre regiões distintas, como em florestas úmida, cidades, oceanos, desertos, entre outros (MORAES, 2010). A parte inferior da CLP , próximo de 10%, é chamada de Camada Limite Superficial (CLS) (STULL, 1988). Nos últimos anos a CLS vem sendo bastante estudada pelo fato de ser a parte da CLP em que ocorrem as maiores trocas de calor, momento e massa.

2.1.1 Camada limite convectiva (CLC)

Durante o dia, a superfície da terra é aquecida pela radiação de onda curta (SWR) emitida pelo sol fazendo com que a camada de ar que está em contato com a mesma também se aqueça. O aumento da temperatura faz com que essa parcela de ar torne-se menos densa que as demais camadas, gerando correntes convectivas (STULL, 1988). Essas correntes de convecção são correntes de ar ascendentes e descendentes que geram a maior parte da turbulência na CLP transportando assim grandezas escalares, momento e energia (OLIVEIRA, 2011). Pode-se dizer que a CLC é uma região instável da CLP gerada por Forçantes Radioativas e auxiliado pelo cisalhamento do vento.

2.1.2 Camada limite estável (CLE)

Durante a noite, não possuindo incidência de radiação de onda curta (SWR) proveniente do sol, a superfície da terra começa a resfriar devido a emissão de radiação de onda longa (LWR) da superfície em direção ao espaço. Nesse momento, inverte-se o processo e a atmosfera começa a aquecer a superfície (Inversão no gradiente vertical de temperatura). Essa inversão no gradiente atua na redução da turbulência, criando uma camada estável na qual o ar tende a permanecer em uma posição de equilíbrio (OLIVEIRA, 2011).

2.1.3 Camada residual (CR)

A camada residual (CR) começa a ser formada pouco antes do pôr-do-sol, quando a CLC decai na forma de uma camada bem misturada devido à redução drástica da turbulência originadas dos forçantes térmicos. Como a CR não toca diretamente na superfície a convecção é praticamente cessada, a turbulência sobrevive por um curto intervalo de tempo (aproximadamente 1 hora após o por-do-sol) (STULL, 1988; OLIVEIRA, 2011). Então, a CR torna-se estratificadamente neutra, resultando em turbulência com intensidade quase igual em todas as direções, fazendo a dispersão de poluentes para essa região com proporções iguais nas direções verticais e transversais, criando uma pluma em forma de cone (STULL, 1988). Pode-se dizer que a CR surge no espaço ocupado anteriormente pelo topo da CLC até o topo da CLE.

2.2 BALANÇO RADIATIVO

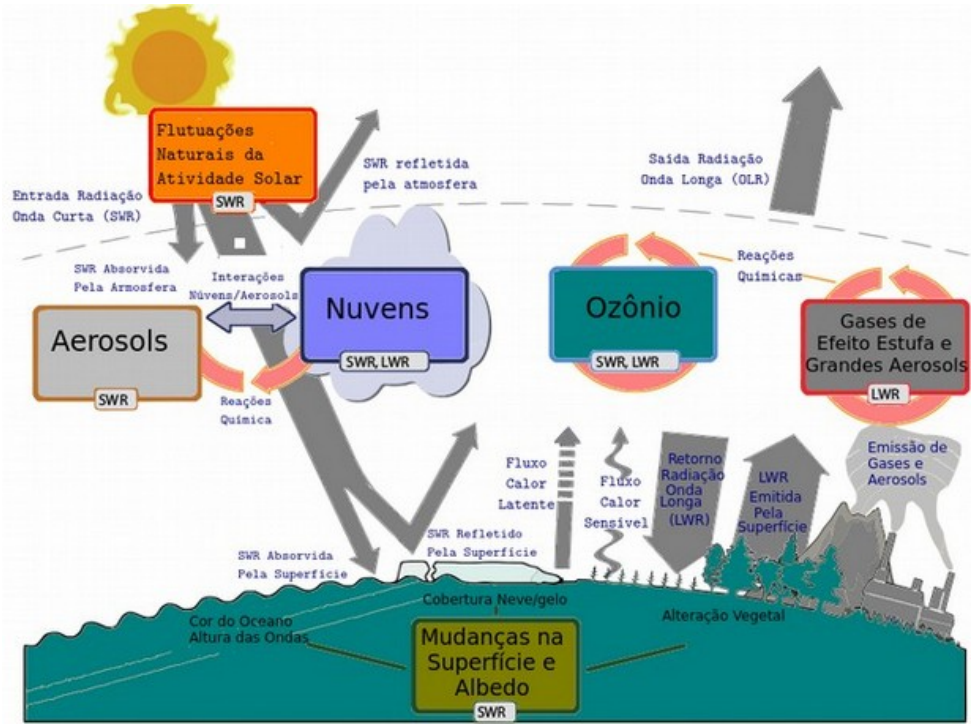
O balanço radiativo e de energia no sistema Terra - Atmosfera é ilustrado pela Figura 2.1. Metade de toda radiação de onda curta (SWR) incidente sobre a Terra atravessa a atmosfera e chega à superfície sendo absorvida pelo solo e oceanos. Dos 50% restantes, 30% retornam ao espaço porque refletem sobre os gases, aerossóis, nuvens e pela superfície da Terra (albedo) e 20% fica retida na atmosfera. A maior incidência de energia ocorre nos trópicos e subtrópicos, sendo parcialmente redistribuída para regiões mais extremas do planeta (IPCC, 2013).

A energia responsável pela elevação da temperatura encontra-se na faixa do espectro infravermelho a qual é denominada de radiação de onda longa (LWR). Parte dessa radiação (LWR) emitida pela superfície terrestre consegue escapar das camadas superiores da troposfera em direção ao espaço, enquanto o restante fica retida nas camadas inferiores da troposfera devido a presença de vapor de água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e outra gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2013).

Os fluxos radioativos estão diretamente ligados a Lei de Planck a qual estabelece a distribuição de densidade de energia emitida por um corpo negro em função da sua temperatura superficial e da frequência da onda eletromagnética. Considerando a Terra um corpo negro, os fluxos radioativos são provenientes da radiação solar (SWR) e a radiação terrestre (LWR) (OKE, 2002). O balanço entre a radiação de onda curta (SWR) a radiação de onda longa (LWR) é denominado Balanço Radioativo, seguindo a seguinte equação:

$$R_n = S\downarrow + S\uparrow + L\downarrow + L\uparrow \tag{2.1}$$

Figura 2.1 – Representação do balanço radiativo na atmosfera



Fonte: Adaptado de (IPCC, 2013, p. 126).

em que R_n é o saldo de radiação, $S \downarrow$ é a onda curta incidente, $S \uparrow$ é a onda curta refletida pela Terra, $L \uparrow$ é a onda longa emitida pela Terra e $L \downarrow$ é a onda longa reemitida pela atmosfera.

2.3 O METANO NA ATMOSFERA

O metano (CH_4) é um composto químico formado por duas substâncias puras (carbono e hidrogênio) denominado hidrocarboneto. O metano é um dos hidrocarbonetos mais simples (com apenas um átomo de carbono e quatro átomos de hidrogênio), no planeta Terra é encontrado na forma gasosa, incolor, inodoro e quando exposto ao oxigênio torna-se altamente explosivo. Os hidrocarbonetos utilizados pela sociedade atual é proveniente do petroleo, sendo a principal componente do gás natural e um dos hidrocarbonetos entre vários outros que compõem a gasolina, o querosene (SOCIETY, 2016; LIOU, 2002). Um grande problema referente a utilização desses recursos energéticos está na emissão de metano para atmosfera durante o processo de extração e mineração do petróleo, hulha, gás natural e xisto além da sua queima.

Outras fontes antropogênicas (proveniente da atividade humana) de grande emissão de metano são dadas através da decomposiçao orgânica por meio de bactérias me-

tanogênicas em aterros, lixões, esgoto, barragens de hidroelétricas, estômago de animais ruminantes como boi e ovelha, cultivo de arroz irrigado por inundação, entre outros (SOCIETY, 2016). Essas bactérias vivem em ambientes sem oxigênio e geram o metano como produto final de seu metabolismo (SOCIETY, 2016). De forma natural, essas mesmas bactérias emitem grande quantidade de metano através dos lagos, regiões pantanosas, cupins e do hidratos de metano liberado pelos oceanos (SOCIETY, 2016). As fontes naturais são responsáveis por aproximadamente 40% de todo o metano emitido para a atmosfera, ao passo que a soma de todas as fontes antropogênicas podem ultrapassar 60% (SOCIETY, 2016).

Com a atual concentração de metano na atmosfera sendo aproximadamente 50% menor que o dióxido de carbono (CO_2), a estrutura molecular de topo esférico faz do CH_4 um poderoso gás de efeito estufa 21 vezes mais eficiente na absorção de calor que o próprio CO_2 (SOCIETY, 2016). Apesar de possuir uma vida relativamente curta (12 anos) comparado com outros gases de efeito estufa, o CH_4 atua absorvendo/emitindo radiação na banda do infravermelho (7,66 μm) sendo efetivo nas transições vibracionais, já que outros elementos químicos, como o H_2O e o CO_2 não possuem grande atuação nessa faixa espectral (SOCIETY, 2016; LIOU, 2002) como mostra o Anexo A.1.

A compreensão dos processos de absorção e/ou emissão de radiação eletromagnética pelos gases do efeito estufa é de grande complexidade. Existem inumeras condições e/ou situações para que um determinado gás consiga desempenhar esse papel, desde a alteração de energia cinética de rotação e translação, energia vibracional e energia eletrônica (LIOU, 2002).

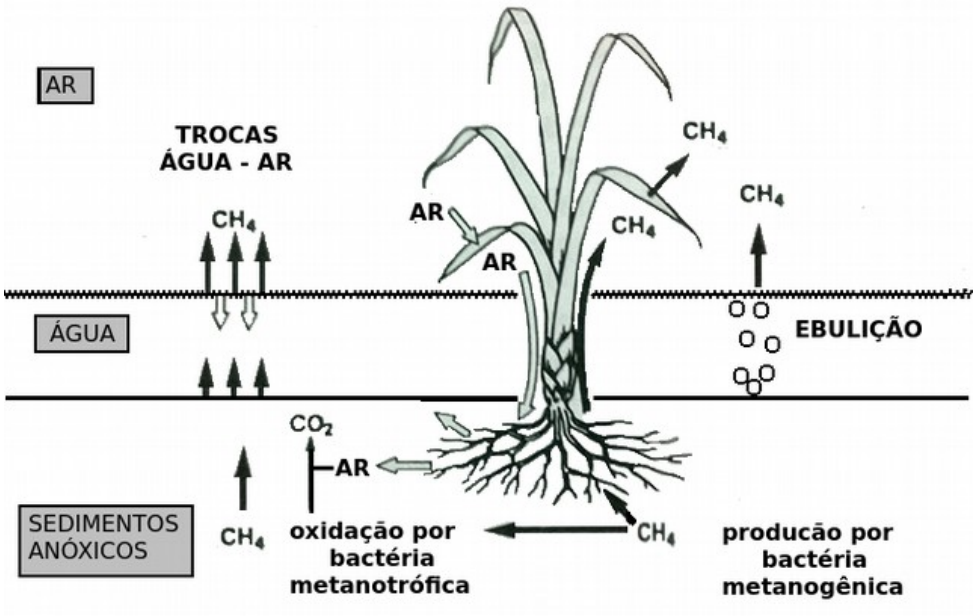
O fato é que: uma molécula de gás de efeito estufa absorve radiação eletromagnética de onda longa emitida pela Terra, onda que deixaria a atmosfera em direção ao espaço (LIOU, 2002). Essa radiação a ser absorvida possui um comprimento de onda específico de acordo com a quantização da energia apresentada por cada estrutura molecular. Quanto mais átomos a molécula possuir, mais graus de liberdade a estrutura terá para sofrer interações e consequentemente, mais complexa é sua absorção e/ou emissão (LIOU, 2002).

As moléculas de gás que absorvem a radiação (fóton) alteram seu estado de energia interno. Um período de tempo depois, o gás tende a voltar ao seu estado de energia natural e acaba reemitindo essa radiação eletromagnética para todas as direções, ocasionando o retorno de parte da radiação que seguiria para o espaço de volta a superfície da Terra (LIOU, 2002). Esses processos serão melhor detalhados na Secção 2.4.

A produção de metano em regiões pantanosas e alagadas é altamente impactada pela composição do solo, PH da água, variação na lâmina de água no solo, tipo de vegetação e de seus estágios fenológicos, quantidade de matéria orgânica em estado de decomposição e da temperatura. Estudos indicam uma relação direta entre a produção de metano por bactérias metanogênicas e a temperatura, chegando a picos na produção

de CH_4 em temperatura próximas de 30 °C (MARANI, 2007; SCHLESINGER, 1997). Em 1990, Schlesinger (1997) descobriu que aproximadamente 90% do CH_4 produzido em áreas de solo alagado da Florida-EUA era destruída por bactérias metanotróficas antes de ser difundido para a atmosfera. Esse processo de produção, oxidação e emissão de metano de áreas pantanosas pode ser melhor compreendido observando a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Processo de produção, oxidação e emissão de metano em solos alagados.



Fonte: Adaptado de (SCHLESINGER, 1997, p. 239).

Do total de metano removido da atmosfera, provenientes de fontes naturais e antropogênicas, se dá na maior parte através de oxidação sofrida por meio da Hidroxila (OH) na região da troposfera, onde;

$$OH + CH_4 \rightarrow CH_3 + H_2O \tag{2.2}$$

desencadeando outras reduções secundárias ($CH_3, CH_3O_2, CH_2O, HCO$). Dependendo das concentrações de NO na atmosfera, a redução do metano resulta em uma produção de Dióxido de Carbono (CO_2) e Ozônio (O_3). Esse processo demanda muita concentração de OH podendo interferir na remoção de outros componentes químicos (MARANI, 2007).

Outra remoção dá-se via solo aerado. É o processo com uma menor absorção e ocorre principalmente por bactérias metanotróficas, as quais, alimentam-se exclusivamente de metano. A eficiência desse tipo de sumidouro pode estar associada a um solo saudável, não compactado e rico em biodiversidade, já que, outras bactérias responsáveis pela oxidação da amônia (NH_3) também podem alimentar-se de metano (MARANI, 2007).

Em publicação, Wuebbles e Hayhoe (2002) indicam a oxidação por hidroxila na

troposfera como o principal e mais importante sumidouro de metano da atmosfera, responsável por aproximadamente 88% das remoções totais, uma média anual de 500 $TgCH_4$, o transporte para a estratosfera via difusão turbulenta chega a 7% e a remoção via solo não passa de 5%. A queima do metano em aterro sanitário e lixões é um opção muito utilizada para minimizar a emissão do gás diretamente para a atmosfera (SOCIETY, 2016).

Apesar de ser uma das maiores fontes de emissão de metano para a atmosfera, as áreas úmidas mostram ser excelentes sumidouros de dióxido de carbono (CO_2) (KRAUSS et al., 2016).

2.4 ABSORÇÃO MOLECULAR

2.4.1 Base para absorção/emissão atômica

Esta secção, as descrições tem base no livro de (LIOU, 2002) e no material disponibilizado pelo (GEF-UFSM, 2014). O modelo clássico de um átomo proposto por Bohr é constituído por um núcleo e por elétrons orbitando em diferentes níveis (estados estacionários). A transição de um determinado elétron entre um nível superior ou inferior da órbita dá-se exclusivamente pela absorção ou emissão de um quantum de energia (fóton) com valor hv, o que corresponde exatamente a essa diferença de energia entre os dois estados estacionários do elétron.

Se a energia do estado inicial for maior que a energia do estado final $E_1 > E_2$ significa que o átomo emitiu um fóton. Do contrário $E_1 < E_2$ um fóton foi absorvido pelo átomo.

$$| \Delta E |= E_2 - E_1 = hv \tag{2.3}$$

Segundo o modelo proposto por Bohr e posteriormente comprovado pelo experimento de Franck-Hertz, a energia do átomo é quantizada devido a existência dos estados estacionários, sendo possível haver transição dos elétrons entre níveis por meio de um fóton com uma frequência de onda v específica para cada tipo de átomo.

$$v = \frac{| \Delta E |}{h} \tag{2.4}$$

Para átomos simples como o de hidrogênio, formado por apenas um elétron em sua órbita, o comprimento de onda do fóton (λ) pode ser calculado facilmente por meio da

expressão:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \tag{2.5}$$

desde que os valores para as órbitas n_1 e n_2 sejam mantidos inteiros e positivos e o valor da constante de Rydberg para o hidrogênio $R_H = 1,097 \times 10^7 m^{-1}$.

Para átomos com maior complexidade, átomos com mais de um elétron em sua órbita mais externa, vai gerar um espectro com mesmo grau de complexidade. Para esse modelo de átomo, a equação anterior pode ser considerada válida para calcular o comprimento de onda, desde que faça-se algumas considerações: os valores para n_1 e n_2 sejam mantidos inteiros e positivos; considerar apenas um único elétron livre na órbita mais afastada do núcleo para sofrer as transições, sendo todos os demais elétrons considerados fixos; e determinar a constante de Rydberg R_n referente ao átomo em questão.

Considerando a energia total do átomo como sendo a soma da energia cinética K_n do elétron quando encontra-se na órbita n e a energia potencia U_n do átomo para a situação anterior em que o elétron encontra-se.

$$E_n = K_n + U_n \tag{2.6}$$

onde

$$K_n = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \tag{2.7}$$

$$U_n = \frac{-Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \tag{2.8}$$

encontra-se

$$E_n = \frac{-Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \tag{2.9}$$

sendo r_n o raio da única órbita possível em que o elétrons pode estar

$$r_n = \left(\frac{\epsilon_0 h}{\pi m_e Z e^2} \right) n^2 \tag{2.10}$$

e alizando as devidas substituições

$$E_n = -\left(\frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}\right)\frac{1}{n^2} \tag{2.11}$$

introduzindo a equação 2.10 em 2.6

$$\lambda v = c \tag{2.12}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{v}{c} = \frac{E_{n2} - E_{n1}}{hc} = \frac{m_e Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 ch^3}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \tag{2.13}$$

chegando expressão final da constante de Rydberg

$$R_n = \frac{m_{eZ^2e^4}}{8\epsilon_0^2 ch^3} \tag{2.14}$$

onde m_e é a massa do elétron, Z número atômico, e carga do elétron, ϵ_0 constante de permissibilidade da luz no vácuo, c velocidade da luz no vácuo e h constante de Planck.

2.4.2 Base para absorção/emissão molecular

A descrição teórica desta secção esta embasada nos livros de (PETTY, 2006; LIOU, 2002). Compreender a emissão/absorção de energia por uma molécula de gás é de grande complexidade, comparada com a atômica, decorrente da estruturação em que as moléculas se dispõem e dos diferentes átomos que as compõem. Logo, o aumento ou a redução da energia interna de um gás pode ser originada por diferentes fatores.

Considerando uma molécula de um gás qualquer como uma partícula, a mesma está sujeita a movimentos. O fato dessa partícula estar em constante movimento no espaço, a mesma possui energia cinética de translação e também energia cinética rotacional pela possibilidade de girar em um eixo fixo sobre seu próprio centro de massa.

Valendo-se da situação anterior, e considerando que essa molécula é composta por dois ou mais átomos, a ligação dos mesmos dar-se-á por meio de forças eletrostáticas que atuam de forma semelhante a uma “mola”, possibilitando a vibração individual dos átomos sobre sua própria posição de equilíbrio. Consequentemente, a molécula de gás também possuirá energia vibracional.

Aprofundando a análise sobre a molécula de gás, além das três energias citadas anteriormente tendo por base modelos mecânicos, existe outra energia denominada de energia eletrônica, a qual é responsável pela estruturação do átomo, realizando as ligações

entre os elétrons e o núcleo como proposto por Bohr em seu modelo atômico.

Em um sistema fechado contendo um gás qualquer em seu interior, tem sua temperatura física alterada ao absorver ou emitir radiação eletromagnética com comprimento de onda específico de acordo com o tipo de gás. Essa radiação eletromagnética (fóton) absorvido ou emitido altera a energia interna do sistema, promovendo alterações na energia cinética de translação, energia cinética rotacional, energia vibracional e energia eletrônica, sendo esta última responsável por unir ou separar por completo dois componentes que formam uma molécula.

A energia de uma partícula colidida por um fóton é dada por $E = hv$ em que h é a constante de Planck e v é a frequência da onda. Sabendo que as moléculas de um determinado gás só podem absorver fótons com determinada energia, o comprimento de onda correspondente a esse fótons pode ser determinado.

$$v = \frac{c}{\lambda} \tag{2.15}$$

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.16}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} \tag{2.17}$$

para todos os outros comprimentos de onda, a molécula não estará absorvendo.

2.4.3 Linha de absorção e emissão

O estado de energia de uma molécula de gás E é determinada pela soma da energia cinética de translação E_t, energia cinética rotacional E_r, energia vibracional E_v e energia eletrônica E_e descritas anteriormente.

$$E = E_t + E_r + E_v + E_e \tag{2.18}$$

Assim como no átomo, os estados de energia de uma molécula são quantizados, permitindo apenas interação com um fóton capaz de realizar uma transição aceitável entre um estado inicial para outro final. Ou seja, para passar de um estado com energia E_0 para outro estado com energia E_n, obrigatoriamente a partícula deverá absorver um fóton espe-

cífico com energia $\Delta E = E_n - E_0$ e comprimento de onda também específico. O mesmo deverá acontecer em casos de emissões (PETTY, 2006; LIOU, 2002). De forma direta e desde que se tenha níveis permitidos, uma molécula pode saltar de um estado inicial para outro estado extremo sem necessidade de realizar saltos aleatórios (LIOU, 2002). Ou seja, se a molécula possuir apenas quatro estados de energia permitidos E_0, E_1, E_2, E_3 poderão ocorrer transições do tipo $E_0 \rightarrow E_1, E_0 \rightarrow E_2, E_0 \rightarrow E_3, E_1 \rightarrow E_2, E_1 \rightarrow E_3, E_2 \rightarrow E_3$ (PETTY, 2006).

Devido a essa quantização dos estados de energia, associa-se bandas ao comprimento de onda do fóton a ser emitido ou absorvido com uma transição dominante (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Associação de bandas eletromagnéticas com diferentes transições.

Comprimento de Onda	Banda	Transição Dominante
> 20μ m	Infravermelho longo, Micro-ondas	Rotacional
1 μ m-20 μ m	Infravermelho curto, Infravermelho térmico	Vibracional
<1 μ m	Visível, Ultra Violeta	Excitação Eletrônica

Fonte: Adaptado de (PETTY, 2006, p. 242).

2.4.4 Transições rotacionais

A descrição teórica desta secção está embasada nos livros de (PETTY, 2006). A massa é uma propriedade da matéria, sendo assim, qualquer corpo ou partícula possui massa. De forma análoga, pode-se considerar a massa m de um corpo como sendo a medida da resistência em que esse corpo possui á aceleração linear

$$F = ma \tag{2.19}$$

então, o momento de inercia I de um corpo é a medida da resistência para a aceleração rotacional quando o mesmo é submetido a um torque τ (Quado 2.1).

$$\tau = I\frac{d\omega}{dt} \tag{2.20}$$

Logo, a energia cinética rotacional E_{kr} se assemelha muito com a energia cinética translacional E_{kt}, sendo essa última proporcional a temperatura absoluta do gás, podendo ser dito que; a temperatura de um gás é a medida da agitação translacional das moléculas.

Considerando apenas uma única partícula sob a ação de um torque resultante, a

Quadro 2.1 – Comparação ente translação e rotação.

m	Massa	Momento de Inércia	I
$p = mv$	Momento linear	Momento angular	$L = I\omega$
v	Velocidade linear	Velocidade angular	ω
$F = ma$	Força	Torque	$\tau = I\alpha$
a	Aceleração linear	Aceleração angular	α
$E_{kt} = \frac{1}{2}mv^2$	Energia cinética translacional	Energia cinética rotacional	$E_{kr} = \frac{1}{2}I\omega^2$

Fonte: Autor.

mesma terá uma variação do seu momento angular proporcional a esse torque. Assim, para um corpo composto por N partículas, seu momento angular será dado pela soma dos momentos angulares de cada partícula.

$$L = L_1 + L_2 + ... + L_N \tag{2.21}$$

$$L = I\omega \tag{2.22}$$

Visto isso, para uma molécula de gás composta por N partículas, o momento de inércia depende de como a massa de cada partícula está distribuída com relação ao centro de massa da molécula. Sendo assim, a inércia da molécula passa a ser a soma das massas (δm) de cada elemento com o quadrado da distância (r_i^2) de seu eixo de rotação.

$$I = \sum_i r_i^2 \delta m \tag{2.23}$$

Utilizando um referencial inercial (sistema arbitrário de três eixos cartesianos) é observado que uma única molécula possui três momentos de inércia principais I_1, I_2, I_3, de modo a estabelecer um momento de inércia diferente para cada tipo diferente de estrutura molecular como mostra a Tabela 2.2.

Importante destacar o porquê das moléculas monoatômicas possuírem zero de momento de inércia. Por esse tipo de molécula ser composta por apenas um átomo, pode-se considerar suas dimensões e massa iguais a do próprio átomo, sendo assim, praticamente toda a massa fica restrita ao núcleo e um raio muito pequeno, logo, possui momento de inércia nulo para situações que envolvem a radiação atmosférica $I_1 = I_2 = I_3 \approx 0$. Assim, embora os gases N_2, O_2 constituírem basicamente a atmosfera, eles não provoquem o efeito estufa.

Tabela 2.2 – Estrutura molecular e seus momentos de inércias.

Descrições	Momentos de inércia	Exemplos
Monoatômico	$I_1 = I_2 = I_3 = 0$	Ar
Linear	$I_1 = 0; I_2 = I_3 > 0$	N_2, O_2, CO_2, N_2O
Topo esférico	$I_1 = I_2 = I_3 > 0$	CH_4
Topo simétrico	$I_1 \neq 0; I_2 = I_3$	NH_3, CH_3, Cl, CF_3Cl
Topo Assimétrico	$I_1 \neq I_2 \neq I_3$	H_2O, O_3

Fonte: Adaptado de (PETTY, 2006, p. 247).

2.4.5 Quantização do momento angular e espectro de absorção rotacional

Utilizando as equações de Schrödinger na mecânica quântica, chega-se um momento angular restrito para uma molécula diatômica rígida com valores dados pela expressão (PETTY, 2006):

$$L = \frac{h}{2\pi}\sqrt{j(j+1)} \tag{2.24}$$

onde $j = 0, 1, 2, ...$ é o número quântico rotacional. Olhando para a equação de energia cinética de rotação E_{kr} e o momento angular L do Quadro 2.1, chega-se aos conjuntos de níveis de energia discretos

$$E_{kr} = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{L^2}{2I} \tag{2.25}$$

$$L = I\omega \tag{2.26}$$

$$E_j = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{j(j+1)h^2}{8\pi^2 I} \tag{2.27}$$

Essa energia rotacional quantizada é descrita para uma molécula linear com apenas dois átomos, um momento de inércia I e número quântico rotacional J (PETTY, 2006).

O caso torna-se muito mais complexo para moléculas com estruturas não-linear em que envolvam mais de dois átomos e que possuam até três momentos de inércia I_n e números quânticos rotacionais j_n. Isso causaria complexas mudanças em vários j_n ao absorver ou emitir fótons de determinado comprimento de onda, sendo que a mecânica quântica não permite determinadas transições entre os estados rotacionais adjacentes (PETTY, 2006).

2.4.6 Transição vibracional

A descrição teórica desta secção está embasada nos livros de (PETTY, 2006; LIOU, 2002). Como mencionado na Secção 2.4.2, em que considera-se uma molécula composta por dois ou mais átomos ligados por meio de forças eletrostáticas que atuam de forma semelhante a uma "mola", possibilitando uma vibração individual dos átomos sobre sua própria posição de equilíbrio. Essa força para pequenas distâncias pode ser dada pela lei de Hooke

$$F = -k(r' - r) \tag{2.28}$$

onde r é a posição de equilíbrio da molécula e r' é a posição no estado de "alongamento" ou "compressão".

Como a massa é uma propriedade da matéria, e a molécula está inclusa nisso, tem-se então um oscilador harmônico simples (OHS) operando com uma determinada frequência v' e uma massa reduzida m'.

$$m' = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \tag{2.29}$$

$$v' = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m'}} \tag{2.30}$$

Assim como o momento angular e os níveis de energia são quantizados, a frequência de vibração de uma molécula também pode ser quantizada. Fazendo-se uso da mecânica quântica, a frequência de vibração atual para uma molécula é dada por:

$$v = \left(\vartheta + \frac{1}{2}\right) v' \tag{2.31}$$

sendo ϑ o número quântico vibracional.

Alterar a frequência de uma molécula implica em alterar o número quântico vibracional ϑ e a energia da mesma.

$$\Delta\vartheta = \pm N \tag{2.32}$$

$$E_\vartheta = hv = \left(\vartheta + \frac{1}{2}\right) hv' \tag{2.33}$$

$$\mid \Delta E_\vartheta \mid = Nhv' \tag{2.34}$$

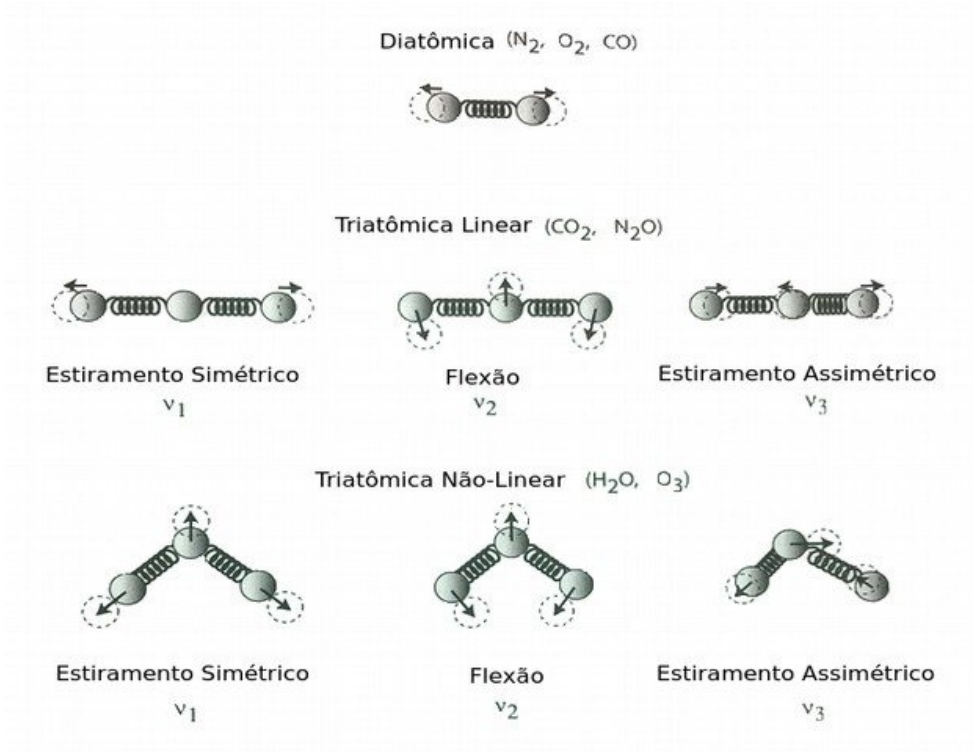
valor esse correspondente a uma frequência ressonante para um OHS.

Segundo Petty (2006, p. 254), "[...] qualquer movimento vibracional fisicamente admissível pode ser expressa como a sobreposição de um conjunto finito de modos normais,[...], cada um dos quais está associada com o seu próprio conjunto de níveis de energia vibracional". Ao passo em que aumente o número de átomos à uma molécula e altera sua estrutura, o número de modos normais multiplica-se drasticamente $N = 3n - 6$ para uma estrutura não linear e $N = 3n - 5$ para estrutura linear. Cada modo de vibração possui um nível de energia (quantizada) e que pode ser expressa apenas por um número quântico vibracional ϑ.

Para moléculas compostas por dois átomos, só é possível um único modo de energia denominado estiramento. Já para as moléculas com três átomos, os modos de energia são; estiramento simétrico ϑ_1, flexão ϑ_2 e estiramento assimétrico ϑ_3, consequentemente, números quânticos $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$. O modos de energia de vibração são ilustrado na Figura 2.3.

Composta por cinco átomos e com uma estrutura não linear, a molécula de metano possui nove modos de vibrações fundamentais $N = 3n - 6 \rightarrow N = 3.5 - 6 \rightarrow N = 9$. Devido a sua estrutura molecular ser de topo esférico, na qual, o átomo de carbono encontra-se no centro dos átomos de hidrogênio, apenas quatro modos de vibrações $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4$ são efetivos, tendo os outros cinco modos equivalentes entre si. Mesmo possuindo quatro modos efetivos entre um total de nove, apenas ϑ_3 e ϑ_4 atuam com significativa energia, com respectivos comprimentos de onda 3,3 μm e 7,6 μm. Com as atuais concentrações de metano na atmosfera, as absorções e emissões de radiação eletromagnética são concentradas na banda do infravermelho térmico 7,6 μm.

Figura 2.3 – Modos de vibrações para moléculas simples.



Fonte: Adaptado de (PETTY, 2006, p. 255).

2.5 MEDIDA DA EMISSÃO SUPERFICIAL DE GEE

2.5.1 Método dos fluxos turbulentos: técnicas *eddy covariance*

A concentração de determinado gás na atmosfera depende principalmente dos processos de emissão e absorção destes pela superfície. Assim, estimar a emissão e/ou absorção de um determinado gás é fundamental para compreender suas variações de concentração na atmosfera. Como vimos na Secção 2.1, próximo da superfície a turbulência é o principal mecanismo de transporte na CLP.

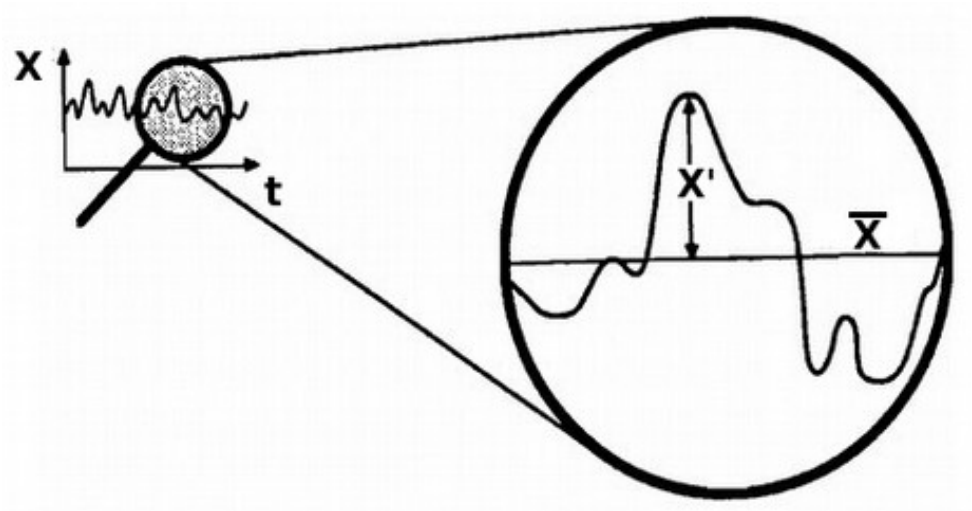
Nos últimos anos, a técnica frequentemente utilizada para estimar esses fluxos turbulentos é a covariância dos vórtices (*Eddy Covariance*). Por meio dessa técnica, são estimados os fluxos verticais de escalares.

O fluxo turbulento, F_Q, para qualquer escalar Q é dado por:

$$F_Q = \rho_a \omega Q \tag{2.35}$$

onde, w é a componente vertical do vento e Q é a razão de mistura do escalar e ρ_a é a densidade do ar.

Figura 2.4 – Ilustração da decomposição de Reynolds.



Fonte: Adaptado de (STULL, 1988, p. 34)

As componentes de uma variável na atmosfera podem ser representadas pela decomposição de Reynolds conforme a Figura (2.4), descrevendo os movimentos turbulentos na atmosfera. Essa decomposição consiste em decompor qualquer variável da equação do fluxo turbulento em uma parte média temporal representada por ($\bar{X}$) e uma parte de flutuação (turbulenta) representada por X' (STULL, 1988):

$$X = \bar{X} + X' \tag{2.36}$$

$$F_Q = \overline{(\bar{\rho_a} + \rho')(\bar{w} + w')(\bar{Q} + Q')} \tag{2.37}$$

$$F_Q = \overline{(\bar{\rho_a}\bar{w}\bar{Q} + \bar{\rho_a}\bar{w}Q' + \bar{\rho_a}w'\bar{Q} + \bar{\rho_a}w'Q' + \rho'_a\bar{w}\bar{Q} + \rho'_a\bar{w}Q' + \rho'_a w'\bar{Q} + \rho'_a w'Q')} \tag{2.38}$$

Pela aproximação de Reynolds, a média de uma flutuação deve ser igual a zero $\overline{\rho'} = \overline{w'} = \overline{Q'} = 0$, sendo assim:

$$F_Q = \overline{(\bar{\rho_a}\bar{w}\bar{Q} + \bar{\rho_a}w'Q' + \rho'_a\bar{w}Q' + \rho'_a w'\bar{Q} + \rho'_a w'Q')} \tag{2.39}$$

Assumindo que a variação da densidade do ar seja nula $\rho'_a = 0$ e que a superfície ondo o sensor está localizado é ideal (plana e homogênea) gerando em um determinado tempo velocidade vertical média igual a zero $\bar{w} = 0$, o fluxo turbulento pode ser definido

como:

$$F_Q = \overline{\bar{\rho}_a w' Q'} \tag{2.40}$$

Como, em geral, são realizadas medidas atmosféricas da densidade molar, ρ_Q e não da razão de mistura, é necessário alterar a expressão anterior para que a mesma fique em termos de densidade molar do escalar:

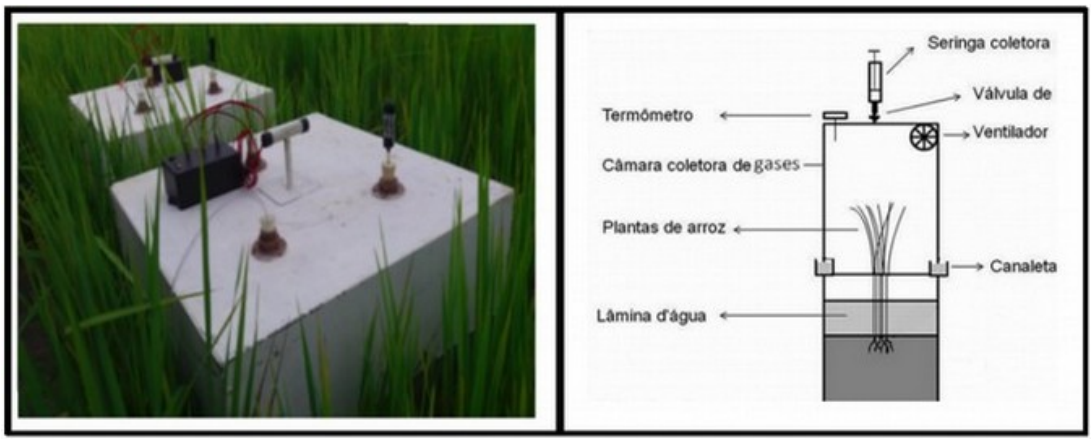
$$F_Q = \overline{\rho_Q w} = \overline{w' \rho'_Q} \tag{2.41}$$

Além disso, esta técnica necessita de uma série de critérios de estabilidade e homogeneidade bem descritos em (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012).

2.5.2 Método da câmara de solo

Bastante utilizado para estimar a respiração do solo, a técnica das câmaras é constituída por modelos de Câmara de Solo Aberta e Câmara de Solo Fechada. Ambos os modelos consistem em delimitar uma área de solo nu ou com vegetação e por meio das câmaras limitar a circulação de ar em seu interior para então realizar medidas das variações nas concentrações de GEE (GOMES; BAYER; MIELNICZUK, 2006). Essas variações determinam os fluxos dos gases de interesse e são obtidas através da realização de coletas em intervalos de tempo previamente determinados (GOMES; BAYER; MIELNICZUK, 2006).

Figura 2.5 – Ilustração do método da câmara de solo fechada.



Fonte: Adaptado de (SILVA; GRIEBELER; FREIRE, 2011).

A grande desvantagem ao fazer uso desta técnica é justamente a obtenção de poucas medidas com relação ao tempo e o espaço, não observando a dinâmica dos fluxos de microescalas (CARMELITA et al., 2014). Justamente essa ausência de dinâmica mascara e impede a identificação de fenômenos que provoquem perturbações ao sistema. Porém, a grande vantagem de utilizar as câmaras fechadas está justamente na praticidade em instalação e operação do equipamento e principalmente na precisão em capturar fluxos de baixa intensidade (CARMELITA et al., 2014).

As amostras coletadas podem ser analisadas no local do experimento por meio de câmaras automatizadas com analisador automático por infravermelho ou por coleta manual com análise laboratorial via cromatografia gasosa, sendo essa a mais utilizada nas estimativas de fluxos de GEE em lavouras de arroz irrigado (GOMES; BAYER; MIELNICZUK, 2006).

As câmaras devem ser padronizadas e confeccionadas com materiais seguros para que minimizem as interações com o ambiente. Quanto maior a área de cobertura da câmara mais precisas são as estimativas das fluxos, porém, as dificuldades de operações e custos de confecções também são aumentados (GOMES; BAYER; MIELNICZUK, 2006).

Deve-se tomar muito cuidados durante as coletas nas câmaras fechadas com análises laboratoriais para minimizar e/ou evitar erros e contaminações das amostras. Para isso, as seringas coletoras necessitam de limpeza entre uma coleta e outra. Os tubos para transporte do gás do campo até o laboratório devem conter vácuo e serem mantidos em temperatura baixa com o auxílio de caixa térmica e gelo. As conexões, mangueiras e vedações devem ser mantidas em perfeito estado de conservação e evitar ao máximo a perturbação do solo, água e plantas no interior da câmara antes e durante a coleta. Caso ocorra a evidência de erros ou contaminações, as amostras em questão deveram ser descartadas. Logo após as coletas, a câmara deve ser aberta novamente para que o ambiente interno continue interagindo com o restante do ambiente.

Ao contrário das câmaras automatizadas em que realizam várias medidas com análises instantâneas, as coletas para análises laboratoriais são realizadas em menor frequência devido ao custo e disponibilidade de aparelhos. Para isso, a coleta de gás deve ser realizada em um período do dia em que representa a média diária. No caso do CH_4 em lavouras de arroz, a coleta deve ocorrer entre as 9:00–11:00 hora local (COSTA et al., 2008). A quantidade de câmaras instaladas e em diferentes locais do experimento aproxima ainda mais das reais concentrações e fluxos dos gases.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Conhecida como a Capital Nacional do Arroz, Cachoeira do Sul está localizada na chamada Depressão Central do Rio Grande do Sul, onde faz parte da micro-região do Vale do Jacuí. A cidade não possui um centro meteorológico, porém, estimativas dão conta que as temperaturas mínimas atingem valores negativos no inverno (chegando a -5 $^{\circ}\mathrm{C}$ nas madrugadas de junho e julho) e temperaturas próximas a 40 $^{\circ}\mathrm{C}$ no verão (nos meses de janeiro e fevereiro).

O Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lμmet-UFSM) realiza pesquisas da interação superfície-atmosfera desde o final do ano de 2009 em uma lavoura de arroz irrigado por inundação, o qual gerou diversos trabalhos científicos (Diaz (2014), Sena (2012), Souza (2013), Carneiro (2012))

Nesta lavoura, a inundação para a irrigação do arroz ocorre por desnível entre parcelas de aproximadamente 100 m X 100 m. A drenagem é feita por canais em um dos lados da parcela. Os canais tem aproximadamente 2 m de largura e 1 m de profundidade (Figura 3.1). O solo é classificado como Planossolo Hidromórfico (SOLOS, 1999).

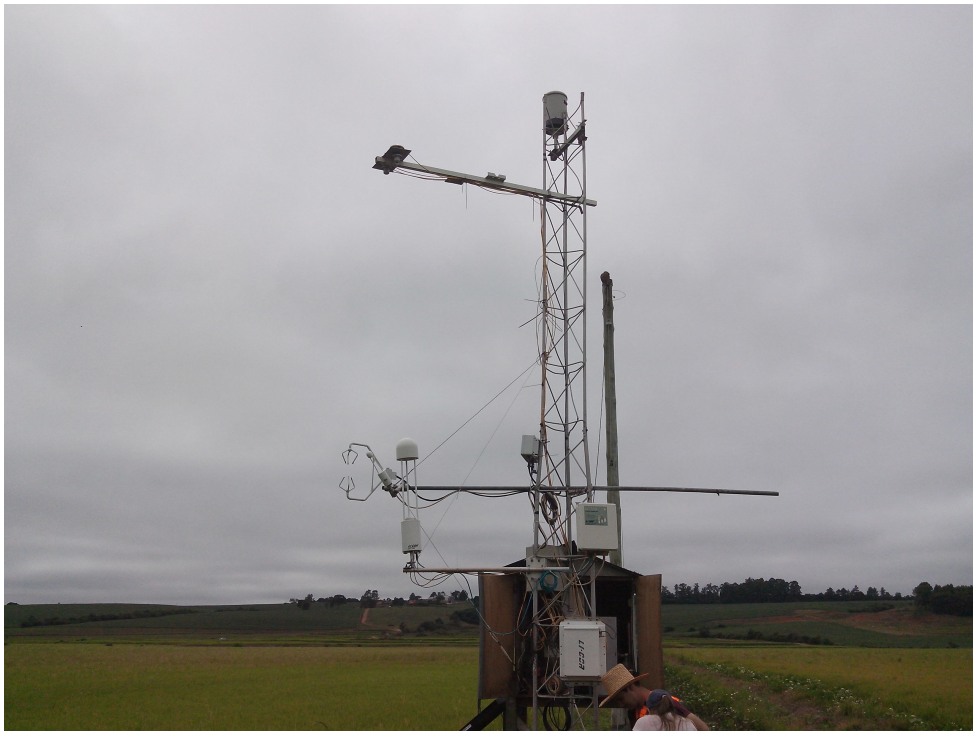
Historicamente, o arroz costuma ser plantado nesta área entre os meses de outubro e novembro e colhido entre março e abril, começando o período de inundação da lavoura antes do plantio do arroz, ainda no preparo do solo para então receber as sementes pré-germinadas com o auxílio de uma aeronave agrícola.

Os dados utilizados nesse trabalho foram obtidos no período de 01 de outubro de 2014 á 30 de abril de 2016. Nesse intervalo ocorreram dois plantios de arroz com a cultivar 118 comum EPAGRI: safra 2014-2015 (plantio: 02 de novembro de 2014; colheita: 06 de abril de 2015) com produtividade média de 0,6 Kgm^{-2}; safra 2015-2016 (plantio: 14 de novembro de 2015; colheita: 16 de abril de 2016) com produtividade média de 0,4 Kgm^{-2}. A inundação é mantida com aproximadamente 10 cm de lâmina d'água de forma constante até a colheita. Após a safra, não faz-se o uso do solo com outras culturas, permanecendo em pousio com gramíneas selvagens.

Figura 3.1 – Localização do sítio experimental (CS): (A) Região Sul do Brasil, (B) Localização do sítio experimental no município de Cachoeira do Sul-RS, (C) inundação por parcelas entre canais de drenagem e (D) localização da torre vista da sede da fazenda.

Fonte: Autor.

Figura 3.2 – Visão do anoemômetro sônico e dos analizadores de gás para o sistema *eddy covariance* .



Fonte: Autor.

3.2 MEDIDAS EM TORRE MICROMETEOROLÓGICA

Na área de estudo está instalada uma torre micrometeorológica desde o final de 2009 composta de diversos sensores para medidas atmosféricas e de solo. O Quadro 3.1 apresenta a configuração da torre desde sua instalação. Esta área é afastada da área urbana e de barreiras naturais (Latitude: -30,2771; Longitude: -53,1479; Altitude de 40,5 m acima do nível do mar) (Figura 3.2 D). A grande área em torno da torre com cultivo de arroz irrigado por inundação, a torna excelente para pesquisas com fluxo de metano, dióxido de carbono, e evapotranspiração, pois as interferências sofridas pelos sensores nela instalados são minimizadas. A distância das barreira naturais estão descritas na Tabela (3.1)

Por estar situado em uma lavoura de arroz irrigado, o LI-7700 fica exposto a poeira e aplicações por meio de aeronave de fertilizantes e defensivos agrícolas com adição de óleo mineral para a melhor fixação dos produtos sobre as folhas das plantas. Isso acaba por sujar a lente do sensor e interferir na qualidade do sinal, consequentemente, na qualidade dos dados. Para isso, a equipe de campo do laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria realiza quinzenalmente a limpeza da lente com o auxílio de água potável, flanelinha e esporadicamente o uso de saponáceo líquido.

O uso de saponáceo começou em 2015, após as aplicações de defensivos agrícolas sobre o sensor. A lente do mesmo ficou com um aspecto embaçado e gorduroso, ocasionando a perda quase que completa do sinal e consequentemente dos dados de CH_4. A utilização de água, flanelinha e detergente de cozinha neutro amenizava o problema, porém, não resolvia por completo. A solução encontrada foi a utilização de saponáceo, o que elevou o sinal do sensor para quase 100 %. Procedimentos de limpeza são realizados em todos os sensores a cada coleta manual de dados (aproximadamente a cada quinze dias).

Tabela 3.1 – Limites do sítio experimental de Cachoeira do Sul (CS) .

Direção	**Distância (m)**	**Barreira Natural**
Norte	2000	Mata ciliar do Arroio Pedro Paulo
Leste	400	Lavoura e Pecuária
Oeste	1000	Mata ciliar do Arroio Pedro Paulo
Sul	3000	Mata ciliar do Arroio Pedro Paulo

Fonte: Retirado de (DIAZ, 2014, p. 35).

Quadro 3.1 – Configuração da torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul (CS).

Instrumento	Medida	Fabricante - Modelo	Altura	Período Inicio	Período Fim
Anemômetro Sônico	u, v, w e Temperatura Virtual	Campbell Scientific – CSAT 3	3 m	10/10/2009	
Analisador de Gás Infravermelho	Concentração de CO_2 e H_2O	LiCor - LI7500	3 m	10/10/2009	
Precipitação	Precipitação	Texas Instruments – TB4 Raingage	6 m	10/10/2009	
Saldo Radiômetro	Saldo de Radiação	Kipp&Zonen / NR-Lite	2,5 m	10/10/2009	20/02/2013
Piranômetro	Radiação de onda curta incidente (Radiação Global)	Kipp&Zonen – CMB6	2,5 m	10/10/2009	20/02/2013
PAR radiômetro	Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)	PAR LITE/Kipp&Zonen	1 m	10/10/2009	12/03/2014
Tempermômetro de solo	Temperatura do solo	Termopar Tipo E/TCAV-L	-0.02 m	10/10/2009	20/11/2015
Tempermômetro de solo	Temperatura do solo	Campbell Scientific - T 108	-0.5 m	10/10/2009	
Fluxímetro	Fluxo de calor no solo	HFP01SC/Hukseflux -	-0.02 m	10/10/2009	20/11/2015
Termometro de água	Temperatura da água	T107 Temperature Probe		30/11/2010	
Nível de água	Sensor de nível da água (Julio)	Fabricação no Lμmet		30/11/2010	
Sistema de energia solar	Painel solar 135 W	Kyocera - KD135SX-UPU	-	09/08/2012	
Piranômetro	Radiação de onda curta incidente (Radiação Global)	Kipp&Zonen – CMP3	2,5 m	20/02/2013	
Piranômetro	Radiação de onda curta refletida	Kipp&Zonen - CMP3	5,6 m	20/02/2013	
Pirgeômetro	Radiação de onda longa incidente	Kipp&Zonen - CGR3	5,6 m	20/02/2013	
Pirgeômetro	Radiação de onda longa refletida	Kipp&Zonen - CGR3	5,6 m	20/02/2013	
PAR radiômetro	Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)	Kipp&Zonen - L190SB	4 m	12/03/2014	
Conteúdo de água no solo	Conteúdo de água no solo	Campbell Scientific - CS616	0 a -0.30 m	12/06/2014	
Termohigrometro	Umidade relativa e temperatura do ar	Campbell Scientific - CS215	3 m	01/10/2015	
Tempermômetro de solo	Temperatura do solo	Campbell Scientific - T 108	-0.05 m	20/11/2015	
Temperatura do solo	Temperatura do solo	Campbell Scientific - T 108	-0.15 m	20/11/2015	
Sensor de distância	Altura do dossel	Campbell Scientific - SR50A	2.20 m	20/11/2015	
Fluxímetro	Fluxo de calor no solo	HFP01SC/Hukseflux -	-0.10 m	20/11/2015	
Analisador de Gás Infravermelho	Concentração de CH4	LiCor - LI7700	3 m	20/11/2015	
Radiômetro Temperatura de Skin	Temperatura de Skin	Apogee - SI-111	2.20 m (40°)	20/11/2015	
Molhamento foliar	Molhamento folhar	Decagon Devices - Dieletric LWS	0.30 m	20/11/2015	
Índice de área foliar (LAI)	Índice de área foliar (iaf)	LiCor - LI-3000A	Portátil	Não continuo	
Controlador de carga	Controlador de carga	LEAD - CCD 1212	-	-	-

Fonte: Autor.

3.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

3.3.1 Sensores atmosféricos

Os sensores com caminho aberto LI 7500 (concentração de H_2O e CO_2), LI 7700 (concentração de CH_4) e o anemômetro sônico CSAT 3 (componentes u, v e w do vento) coletam dados em alta frequência e são utilizados para as estimativas de fluxos turbulentos através da técnica de covariância dos vórtices. O processamento dos dados foi realizado no laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lμmet-UFSM) utilizando o *software EddyPro*®, versão 5.1.1, LiCor (Lincoln, Nebraska, EUA) para médias de 30 minutos. O mesmo processamento aqui utilizado foi realizado por Diaz (2014).

No software EddyPro estão implementadas diversas combinações de correções e ajustes. Os fluxos utilizados nesse trabalho foram obtidos utilizando as seguintes configurações: cálculo das flutuações turbulentas em média móvel (MONCRIEFF, 2004), rotação dupla (WILCZAK et al., 2001), correção para os efeitos da densidade (WEBB et al., 1980), correção espectral de alta frequência (GASH e CULF, 1996), correções filtro passa alta e baixa seguindo MONCRIEFF et al., (2004) e MONCRIEFF et al., (1997), respectivamente.

Um processamento foi realizado para a retirada dos valores espúrios dos fluxos processados devido a fatores que influenciam no correto funcionamento dos sensores podendo gerar valores incorretos de fluxos (BURBA; ANDERSON, 2005). Foram removidos valores de fluxos que não correspondem a real capacidade da cultura de arroz em realizá-los, dada as condições climáticas. Neste caso, valores de fluxo de metano superiores a 0,5 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ ou negativos foram removidos. Também foram removidos fluxos na ocorrência de precipitação. Devido a forma geométrica do analisador de gás LI-COR LI7700 e do anemômetro sônico, gotículas de chuva podem ficar armazenadas nos sensores, afetando a qualidade de suas medidas. Sendo assim, é necessário que no período de ocorrência de precipitação, acrescido de meia hora (para secagem do instrumento) os valores de fluxo sejam descartados (RUPPERT et al., 2006).

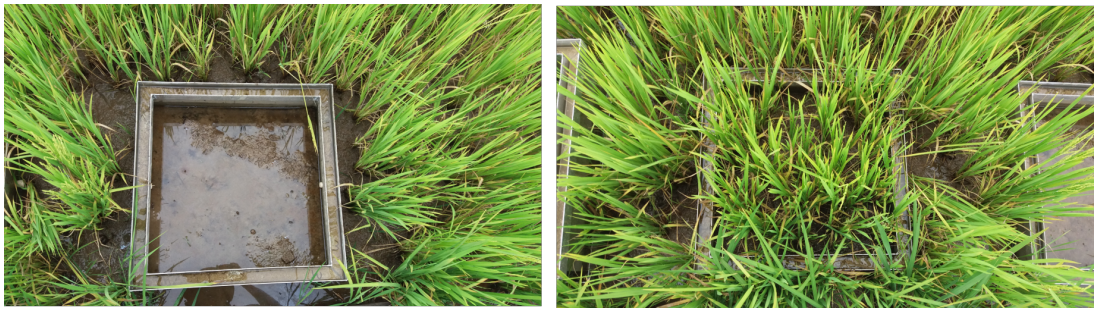
Para estimativas de emissão de metano para uma safra de arroz, por exemplo, é necessário ter uma série temporal completa dos fluxos superficiais. Para tanto, utilizamos a técnica de preenchimento de falhas proposta por Reichstein et al., 2005 que preenche os dados faltante por um valor médio em condições meteorológicas semelhantes das variáveis temperatura do ar, radiação global e deficit de pressão de vapor em janelas temporais variáveis. Esta técnica foi utilizada em análise semelhante realizada por (CARMELITA et al., 2014). Para o correto funcionamento da técnica de preenchimento, não se deve ter falhas nas forçantes atmosféricas. Assim, para o sitio de Cachoeira do Sul foram utilizados dados da estação do INMET de Santa Maria, quando disponível. Correções via regres-

são linear foram aplicadas para cada variável para obtenção de uma seria de forçantes atmosféricos contínuos. O procedimento de fechamento de falhas foi realizado utilizando o pacote REddyProc.

3.3.2 Câmara de solo

Para a safra 2014-2015, foram utilizadas três câmaras de solo fechadas as quais foram realizadas coletas dos gases em períodos de tempos de 0, 5, 10 e 20 minutos para cada câmara, sendo simultaneamente em duas primeiras e posteriormente na terceira. Foram realizadas medições de temperatura no interior das câmaras e na água próxima das câmaras no momento de cada coleta. A lâmina d'água no interior das câmaras também foram medidas para encontrar o volume de gás de cada câmara para todos os dias coletados.

Figura 3.3 – Foto das câmaras de solo instaladas no sítio experimental de Cachoeira do Sul na safra 2015-2016. Na esquerda, câmara sob solo nu, na direita câmara com plantas.



Fonte: Autor.

Para a safra 2015-2016, foram instaladas quatro câmaras de solo seguindo os mesmos procedimentos e cuidados da safra anterior, porém, três câmaras contendo plantas de arroz e uma em solo nu (Figura 3.3). A realização das coletas era feita simultaneamente a cada duas câmaras.

Logo após as coletas no campo utilizando seringas com válvulas de três estágios, as amostras eram transferidas com o auxílio de uma agulha para ampolas de vidro contendo vácuo. O transporte das amostras era feito com temperatura controlada e então despachadas imediatamente para análise laboratoriais de cromatografia gasosa.

Todo o processo de instalação das câmaras e coleta das amostras foram realizadas em parceria com a Embrapa Clima Temperado, sendo que a cada semana uma equipe era responsável pelas coletas entre às 09:00 e 11:00 h da manhã (hora local).

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

O analizador de gás CH_4 LI-7700 foi instalado no início da safra 2014-2015, no entanto, ocorreram problemas de sincronização entre este sensor e o *datalogger*. Portanto, não foi possível estimar os fluxos de metano nesta safra, embora foram coletados dados de emissão de metano no solo através das câmaras de solo.

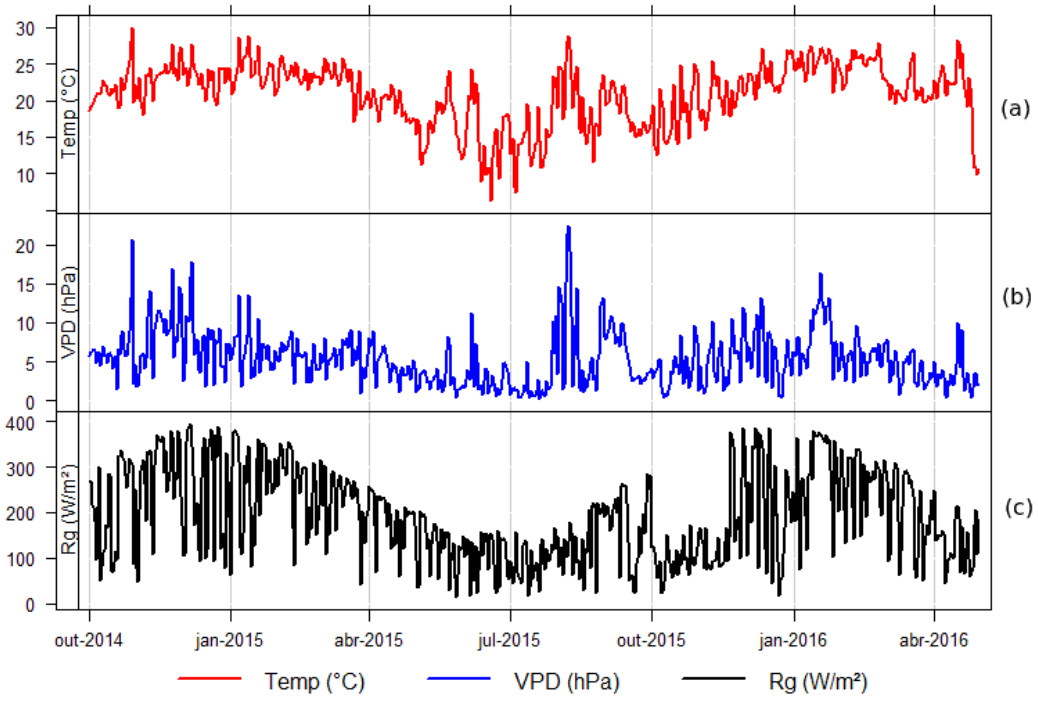
Mesmo não sendo o objetivo principal deste trabalho, faremos uma análise dos fluxos de CO_2 tanto obtidas pela câmara de solo quanto pela torre (metodo *eddy covariance*). Esta análise se dará no sentido de entendermos as relações entre os dados obtidos pela câmara de solo e pela torre. Como a câmara de solo também estima a emissão do CO2, representando a emissão do ecossistema, estes dados podem ser comparados com estimativas da respiração do ecossistema obtidos pela partição do fluxo de CO2 atmosférico. A técnica de partição deste fluxo entre respiração do ecossistema e assimilação pelas plantas (LASSLOP et al., 2010) é bastante utilizada e aqui foi obtida através do *Software REddyProc*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONDIÇÕES AMBIENTAIS

A Figura 4.1 mostra as média diária das variáveis meteorológicas no sítio experimental de Cachoeira do Sul (CS) no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de Abril de 2016. A temperatura média diária para esse período apresentou uma variação esperada para uma região de clima subtropical do hemisfério Sul, com temperaturas elevadas para os meses de outubro a fevereiro e temperaturas amenas entre abril a setembro com pequenos veranicos[1] nas estações frias. Foram registradas mínimas de 6,2 °C em 19 de julho de 2015 e máxima de 29,9 °C em 29 de outubro de 2014.

Figura 4.1 – Média diária das variáveis meteorológicas no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de Abril de 2016. (a) Temperatura do ar (Temp), (b) deficit de pressão de vapor (VPD) e (c) radiação global (Rg) no quadro inferior.

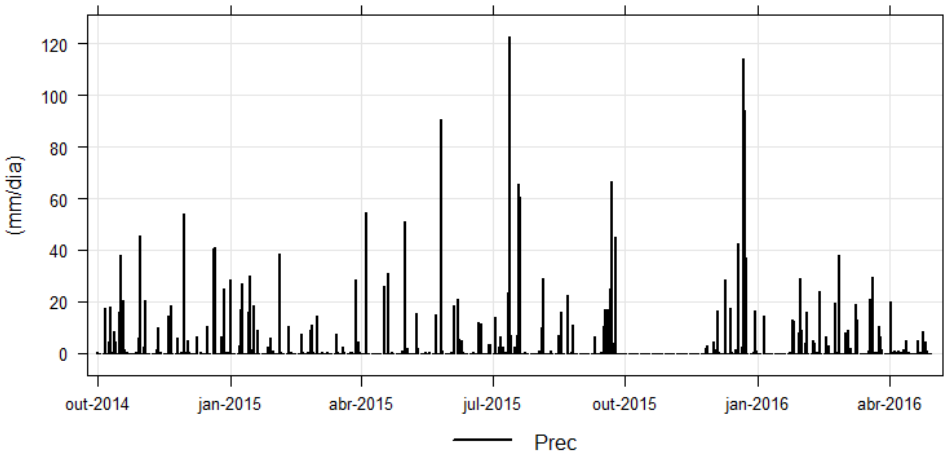


Fonte: Autor.

A radiação global (Rg) mostra uma variação significativa da incidência dos raios solares para cada período do ano sobre o sítio de Cachoeira do Sul (CS), com maiores

[1] Veranico: expressão coloquial utilizada no Estado do Rio Grande do Sul para denominar períodos atípicos com temperatura elevada durante a estação fria.

Figura 4.2 – Precipitação diária no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 01 de outubro de 2014 a 30 de Abril de 2016.



Fonte: Autor.

incidências nos meses de novembro a fevereiro e menores entre maio a agosto. A média diária da (Rg) apresentou valores extremos entre 13,64 Wm^{-2} e 395,31 Wm^{-2} para os respectivos dias 27 de maio de 2015 e 06 de dezembro de 2014. No período de 30 de setembro a 21 de novembro do ano de 2015, a média diária da Rg ficou muito abaixo do esperado, onde os picos deveriam aumentar de forma gradativa de 280 Wm^{-2} até 370 Wm^{-2} para esse intervalo. Acredita-se que essa redução brusca nos dados da Rg é decorrente de algum problema apresentado pelo sensor ou dutante a coléta dos dados.

As variações da média diária do VPD acompanhou a amplitude das variações da temperatura do ar, chegando a valores máximos de 20,59 hPa e 22,43 hPa para os dias 29 de outubro de 2014 e 08 de agosto de 2015, respectivamente. Considerado como a diferença entre a pressão de vapor d'água no ar e a pressão máxima que pode ser alcançada, essa relação entre as variações da temperatura do ar e do VPD mostra que a evaporação depende fortemente da temperatura.

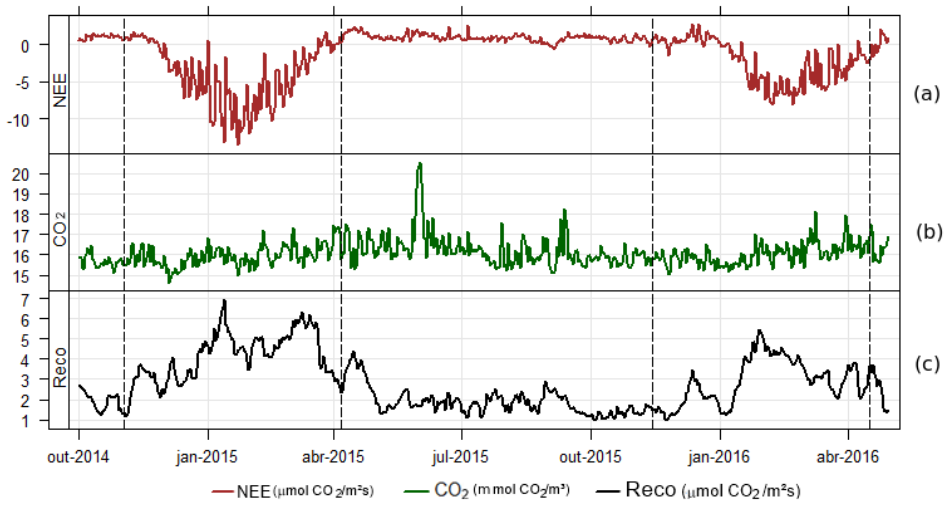
A precipitação (Figura 4.2) mostra uma boa distribuição hídrica para todo o período analisado. Os dias 27 de maio, 13 de julho e 22 e 23 de dezembro do ano de 2015 tiveram maior precipitação, chegando ao acumulado de 90,68 mm, 122,43 mm, 114,3 mm e 94,23 mm, respectivamente. Foi detectado falhas no dados de precipitação para o período de 30 de setembro a 21 de novembro do ano de 2015, mesmo período dos baixos valores de Rg.

4.2 FLUXOS ATMOSFÉRICOS

4.2.1 Dióxido de Carbono

A Figura 4.3 mostra a concentração de CO_2, a troca líquida de CO_2 do ecossistema (NEE) e a respiração do ecossistema (Reco). A NEE foi obtida pelo método *eddy covariance* e a Reco pela partição de NEE. A concentração do dióxido de carbono não apresenta variações significativas para períodos de cultivo do arroz e nem para períodos de pousio. Alguns picos na concentração foram identificados em 01 de junho e 12 de setembro do ano de 2015 com os valores de 20,57 $mmolm^{-3}$ e 18,28 $mmolm^{-3}$, respectivamente e o menor valor registrado ocorreu em 05 de dezembro de 2014 com 14 $mmolm^{-3}$. Esses picos máximos possuem variações curtas no tempo, não caracterizando influências do bioma, mas sim de forçantes meteorológicos.

Figura 4.3 – (a) Troca Líquida do Ecossistema (NEE), (b) Concentração de CO_2 e (c) Respiração do Ecossistema (Reco) no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de abril de 2016. As linhas verticais pontilhadas representam o início e o fim das safras.



Fonte: Autor.

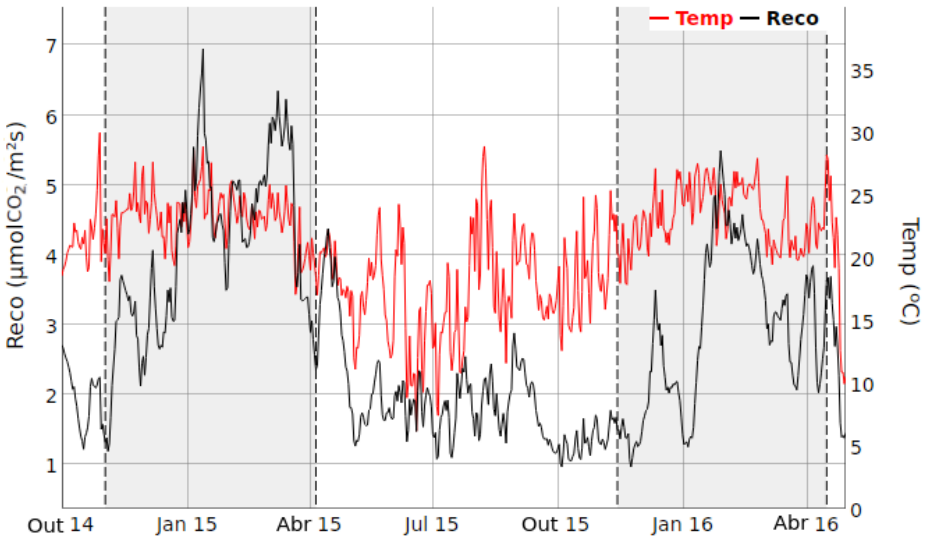
Ao comparar esses picos de concentração de CO_2 com a radiação global (Rg) para os mesmos períodos, é observado que a Rg sofreu grandes reduções em sua incidência sobre a área em períodos que antecederam esses pico. Isso pode ter causado uma redução nos processos de turbulência próximo a superfície, ocasionando uma maior retenção dos gases a superfície abaixo dos sensores. Quando a radiação voltou a promover maior turbulência, esse acumulado pode então ser detectado pelo sensor.

A troca líquida do ecossistema (NEE) mostrou que a lavoura é uma fonte de emis-

são de CO_2 durante o período de pousio, preparo do solo e semeadura do arroz (valores positivos) e passa a ser um sumidouro logo após o período de desenvolvimento vegetativo até a colheita do arroz (valores negativos). Os picos de absorções em cada safra foram de 13,47 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ em 23 de janeiro de 2015 para a safra 2014-2015 e 8,01 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ em 22 de fevereiro de 2016 para a safra 2015-2016. Nota-se a menor absorção na segunda safra, o que é comprovado pela menor produtividade nessa safra, sendo 25% menor que a primeira safra, 6,0 Kg/m^2 e 4,5 Kg/m^2, respectivamente.

A respiração do ecossistema (Reco) aumenta significativamente para o período de cultivo do arroz. A safra 2014-2015 foi a que mostrou maior aumento da respiração, passando de 1,18 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ em 04 de novembro de 2014 para 6,95 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ em 13 de janeiro de 2015, onde os valores voltaram a decair até o pousio. O mesmo ocorreu para a safra 2015-2016, onde o valor mínimo passou de 0,96 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ para 5,49 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ no pico máximo. Para um cultivo de arroz irrigado na Califórnia-EUA, Hatala et al. (2012) obteve resultados semelhantes. Os maiores valores para a respiração do ecossitema são observados no decorrer do mês de janeiro devido ao período de desenvolvimento máximo do arroz. Essa diferênça na respiração do ecossistema (Reco), na troca líquida (NEE) e na produtividade entre as duas safras está associado ao fenômeno *El Niño* que em 2015-2016 foi considerado o segundo maior da história, perdendo apenas para 1997-1998 (CLIMATEMPO, 2016).

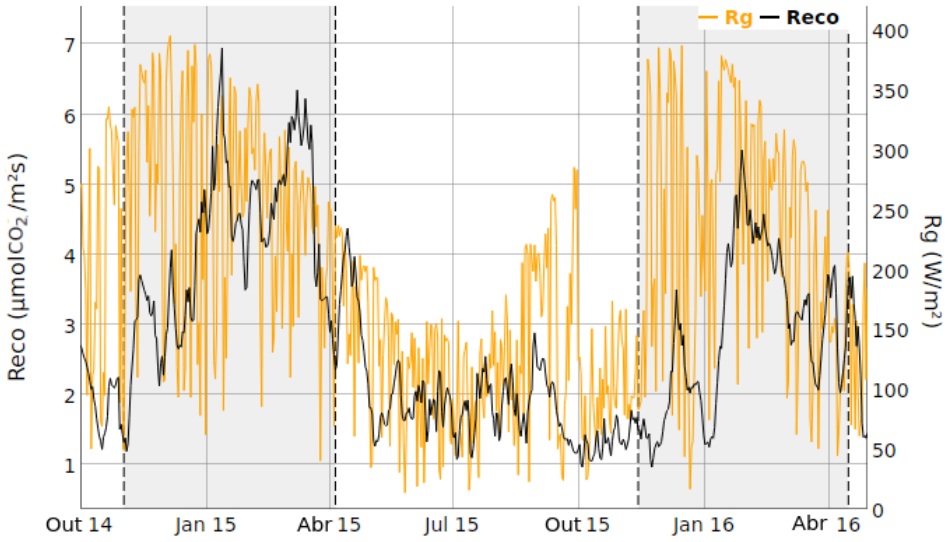
Figura 4.4 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas hachuradas representam as safras de arroz.



Fonte: Autor.

A relação entre a respiração do ecossistema e a temperatura média do ar (Figura 4.4) mostra um acompanhamento das variações da respiração conforme a temperatura oscila. Essa variação da respiração acompanhando a temperatura é melhor observada

Figura 4.5 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas hachuradas representam as safras de arroz.



Fonte: Autor.

durante o pousio da lavoura, onde as plantas nativas não possuem desenvolvimento vegetativo tão elevado e uniforme como o arroz. Mesmo durante o cultivo do arroz, onde se espera um aumento seguido de uma redução da Reco para o mesmo período e em que a temperatura sofre mesmo comportamento, essa relação também pode ser observada.

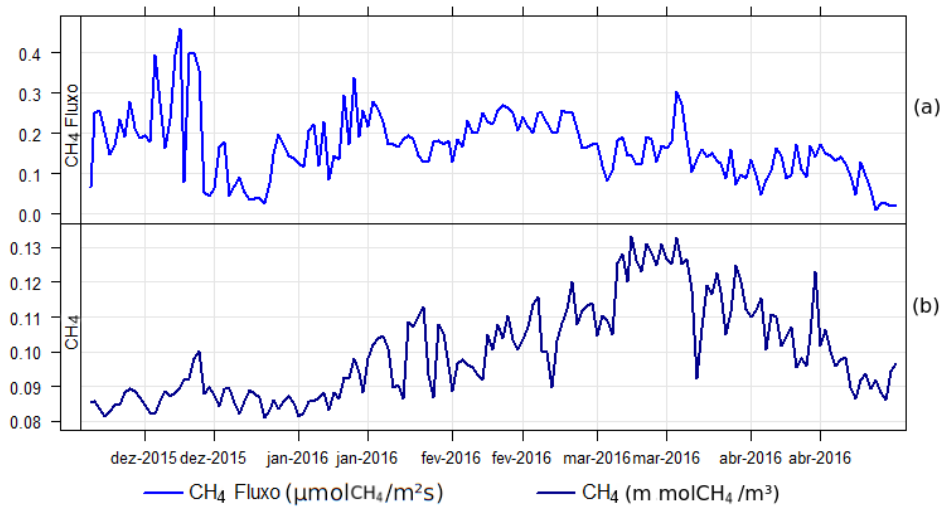
A mesma variação é observada na comparação da respiração com a radiação global (Rg) (Figura 4.5), pois essas variações estão relacionadas diretamente com a maior ou menor abertura dos estômatos das plantas e pela produção de fotossíntese. A relação da Reco com a Rg é evidenciada no período de 12 de dezembro de 2015 a 14 de janeiro de 2016 onde a respiração do ecossistema decaiu significativamente juntamente com a média diária da radiação global incidente. Este período, o arroz esta na fase fenológica de máximo desenvolvimento da cultura. Com pouca radiação para o período, o processo de fotossíntese ficou afetado, ocasionando menor desenvolvimento da cultura e consequentemente menor respiração.

4.2.2 Emissões de Metano

Os fluxos atmosféricos de metano foram estimados com a técnica EC a partir de 20 de Novembro de 2015, porém o plantio ocorreu dia 14 de novembro de 2015. O fluxo de CH_4 teve pico máximo de emissão 28 dias após o plantio do arroz (08 de dezembro de 2015) com 0,46 $\mu mol CH_4 m^{-2} s^{-1}$ e menor pico de emissão durante o pousio da lavoura

(26 de abril de 2016) com 0,009 $\mu molCH_4m^{-2}s^{-1}$ (Figura 4.6 a). São observados valores elevados de emissão durante o desenvolvimento da planta até próximo da maturação dos grãos e uma redução na taxa de emissão no decorrer da maturação até o pousio. Estes valores estão de acordo com diferentes técnicas de medidas obtidos em lavoura de arroz irrigado no Brasil (LIMA; PESSOA; LIGO, 2002; SILVA; GRIEBELER; FREIRE, 2011), e no mundo (IPCC, 2007). O valor médio da emissão de metano para o período analisado foi de 0,168 $\mu molCH_4m^{-2}s^{-1}$. Extrapolando esse valor para toda a safra de arroz irrigado 2015-2016 (14 de novembro de 2015 a 16 de abril de 2016) obtemos um total de 35,7 gCH_4m^{-2}, valor semelhante a Meijide et al. (2011).

Figura 4.6 – Média diária das variáveis: (a) fluxo de metano e (b) concentração de metano no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016.

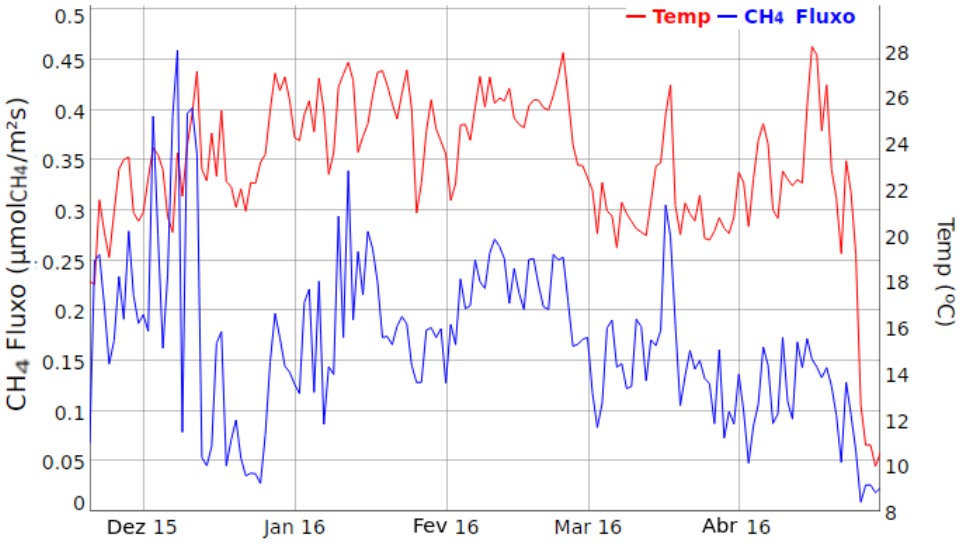


Fonte: Autor.

A concentração de CH4 (Figura 4.6 b) apresentou gradativa elevação em seus valores 56 dias após o plantio (09 de janeiro de 2016), passando de 0,09 $mmolCH_4m^{-3}$ para um máximo de 0,13 $mmolCH_4m^{-3}$ 115 dias após o plantio (08 de março de 2016), onde manteve-se elevado por 11 dias consecutivos. Após o dia 19 de março de 2016 a concentração começou a diminuir até o período de pousio na mesma proporção a qual vinha elevando-se.

Como o fluxo de metano em lavouras de arroz irrigado por inundação é proveniente de processos bacterianos, buscou-se comparar o fluxo de CH_4 com variáveis capazes de interferir no desenvolvimento dessas bactérias. Para isso, comparou-se as médias diárias do fluxo de CH_4 com as variáveis de radiação global (Rg) e temperatura do ar (Temp). Ao analisar as médias diária da temperatura do ar e do fluxo de metano (Figura 4.7), observa-se uma resposta rápida das emissões de CH_4 frente a variações do temperatura do ar. Em determinados períodos é possível observar o tempo de resposta ocorrer quase

Figura 4.7 – Fluxo de Metano e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016.



Fonte: Autor.

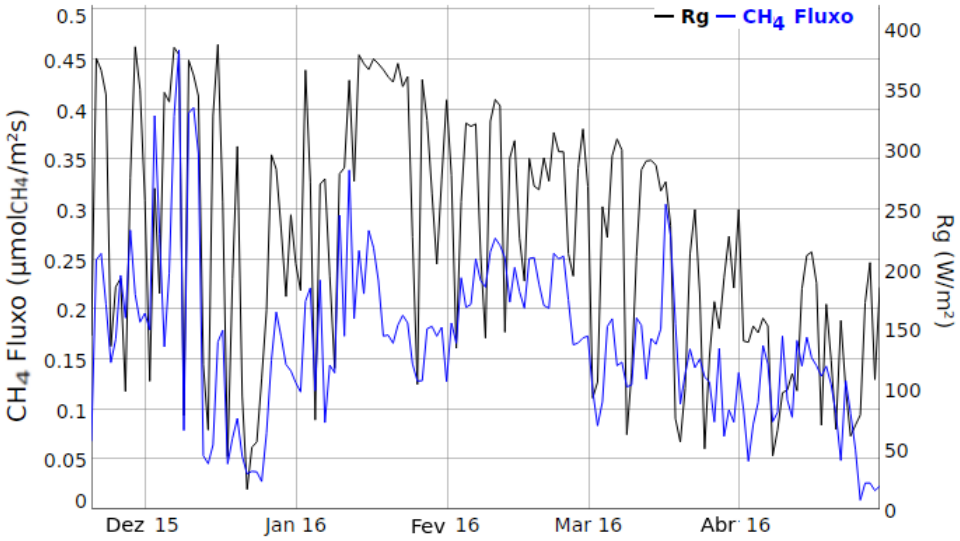
imediatamente.

Para a safra 2015-2016, os picos de máximo e mínimo da temperatura média diária ocorreram em 16 e 29 de abril do ano de 2016 com os respectivos valores de 28,2 $^{\circ}\mathrm{C}$ e 9,96 $^{\circ}\mathrm{C}$. Nesse período a lavoura estava sendo colhida e a área estava em pousio (Figura 4.7).

Já a radiação global teve picos máximos e mínimos de 387,08 Wm^{-2} e 16,63 Wm^{-2} nos respectivos dias 16 e 22 de dezembro do ano de 2015. As medidas dos dados da Rg mostram uma redução gradativa dos máximos incidentes sobre a área com a aproximação da estação inverno. Observa-se uma significativa redução no fluxo de CH_4 entre os dias 08 a 25 de dezembro de 2015, passando de 0.46 para 0,03 $\mu molCH_4m^{-2}s^{-1}$ (Figura 4.8).

Não foi possível estabelecer relações direta entre essa redução do fluxo com o regime hídrico da lavoura, pois não existem registros dos dados de precipitação e medidas do nível da lâmina d'água para esse período. A variação da temperatura foi registrada para o mesmo período, porém, os valores não foram tão significativos, capaz de promover tamanha redução já que para o restante do ciclo do arroz as variações da temperatura do ar foram maiores com variações do fluxo de CH_4 menor. A radiação global (Rg) poderia ser uma das prováveis causas dessa redução brusca da emissão do CH_4. Porém, é observada a redução do fluxo antes de ocorrer a redução da Rg.

Figura 4.8 – Fluxo de Metano e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016.



Fonte: Autor.

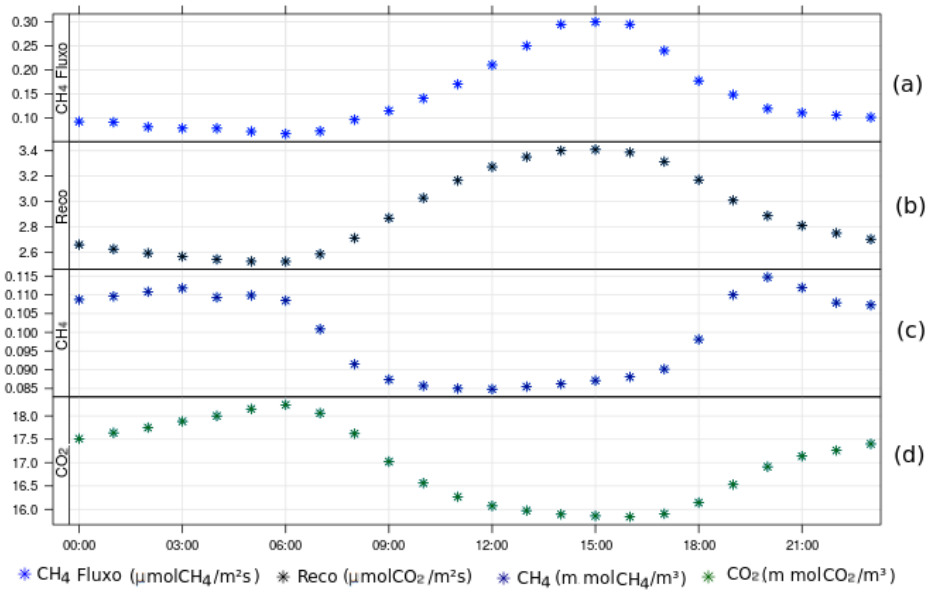
4.2.3 Ciclo diurno

A Figura 4.9 mostra o ciclo diurno da safra de arroz 2015-2016 referente as variáveis: (a) fluxo de metano (CH4 Fluxo), (b) respiração do ecossistema (Reco), (c) concentração de metano (CH_4)e (d) concentração de dióxido de carbono (CO_2). O comportamento do fluxo de metano (CH4 Fluxo) e a respiração do ecossistema (Reco) mostram um comportamento similar um do outro, com emissões máximas chegando aos respectivos valores 0,299 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ e 3,409 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ às 15:00 horas e emissões mínimas com respectivos valores 0,066 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ e 2,526 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ às 06:00 horas (hora local) (Figura 4.9 a & b). A diferença entre o comportamento do CH4 Fluxo para com relação a Reco está na acentuação do grau de variação de seus fluxos no decorrer das horas, sendo a variação da Reco mais acentuada com relação ao fluxo de metano.

As concentrações de metano e de dióxido de carbono sofrem redução no período do dia e aumento na parte da noite, com registros de 0,1144 $mmolm^{-3}$ no pico máximo às 20:00 horas e valor mínimo de 0,084 $mmolm^{-3}$ para às 12:00 horas para a concentração de metano (Figura 4.9 c). A concentração de dióxido de carbono possui comportamento inversamente proporcional ao Reco. Com mesma acentuação durante as varições, a concentração de CO_2 atinge seu valor máximo de 18,23 $mmolm^{-3}$ às 06:00 horas e valor mínimo de 15,84 $mmolm^{-3}$ às 16:00 horas (Figura 4.9 d).

Em análise do ciclo diurno do fluxo de metano no arroz, Meijide et al. (2011) obteve picos diários similares aos daqui encontrados. Carmelita et al. (2014) obteve valores máximos de emissão com aproximadamente uma ordem de grandeza menor que os obtidos nesse trabalho. Aqui obtivemos picos de 0,3 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ e Carmelita et al. (2014) obteve

Figura 4.9 – Ciclo diurno no período de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016 das variáveis: (a) fluxo de metano (CH_4 Fluxo), (b) respiração do ecossistema (Reco), (c) concentração de metano (CH_4) e (d) concentração de dióxido de carbono (CO_2) no sítio experimental de Cachoeira do Sul.



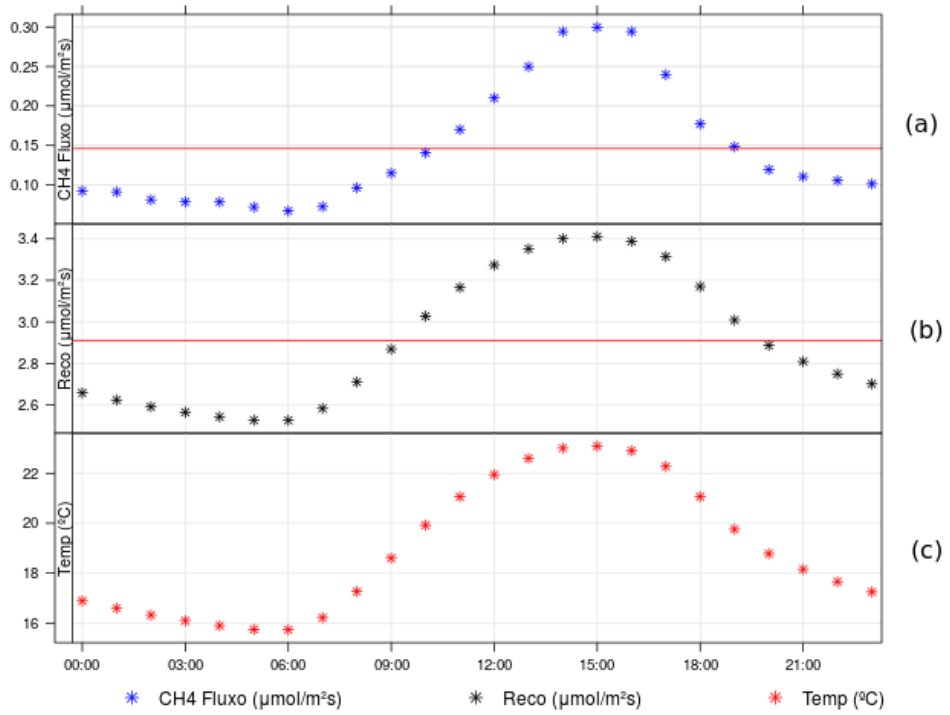
Fonte: Autor.

picos de 0,06 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ aproximadamente nos mesmo horário que aqui encontrados (15:00 h). A ocorrência do máximo no ciclo diurno as 15:00 h (horário local) está lidado ao período do dia em que a temperatura média diária também é máxima.

O ciclo diurno da concentração de CH_4 foi similar as concentrações obtidas por Baldocchi et al. (2012) em região alagada na Califórnia-EUA.

Partindo da suposição de que a técnica de *eddy covariance* está correta, o ciclo diurno do fluxo de metano e a respiração do ecossistema indicariam os horários ideias para a realização das amostragens gasosas na câmara do solo para que as mesmas possam ser extrapolada até a próxima coleta. Na Figura 4.10 a linha vermelha horizontal indica a média do ciclo diurno obtido por meio do *eddy covariance* em que o horário detentor do valor próximo e/ou igual ao valor da média indica o horário ideal de coleta para a câmara de solo. Foram obtidos horários diferentes para as coletas de gás com a câmara de solo a fim de estimar a emissão do metano (Figura 4.10 a) e a respiração do ecossistema (4.10 b). O horário representativo para as coletas do metano no sítio experimental de Cachoeira do Sul é as 10:00 e as 19:00 horas (hora local) e para a respiração do solo as 09:00 e as 20:00 horas (hora loca). O período em que ocorrem os picos máximos no fluxo de metano e na respiração do ecossistema coincide com o horário em que ocorre o máximo na temperatura do ar (15:00 horas), visível com a Figura 4.10 c.

Figura 4.10 – Ciclo diurno no período de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016 das variáveis: (a) fluxo de metano (CH_4 Fluxo), (b) respiração do ecossistema (Reco)e (c) temperatura do ar (Temp) no sítio experimental de Cachoeira do Sul.



Fonte: Autor.

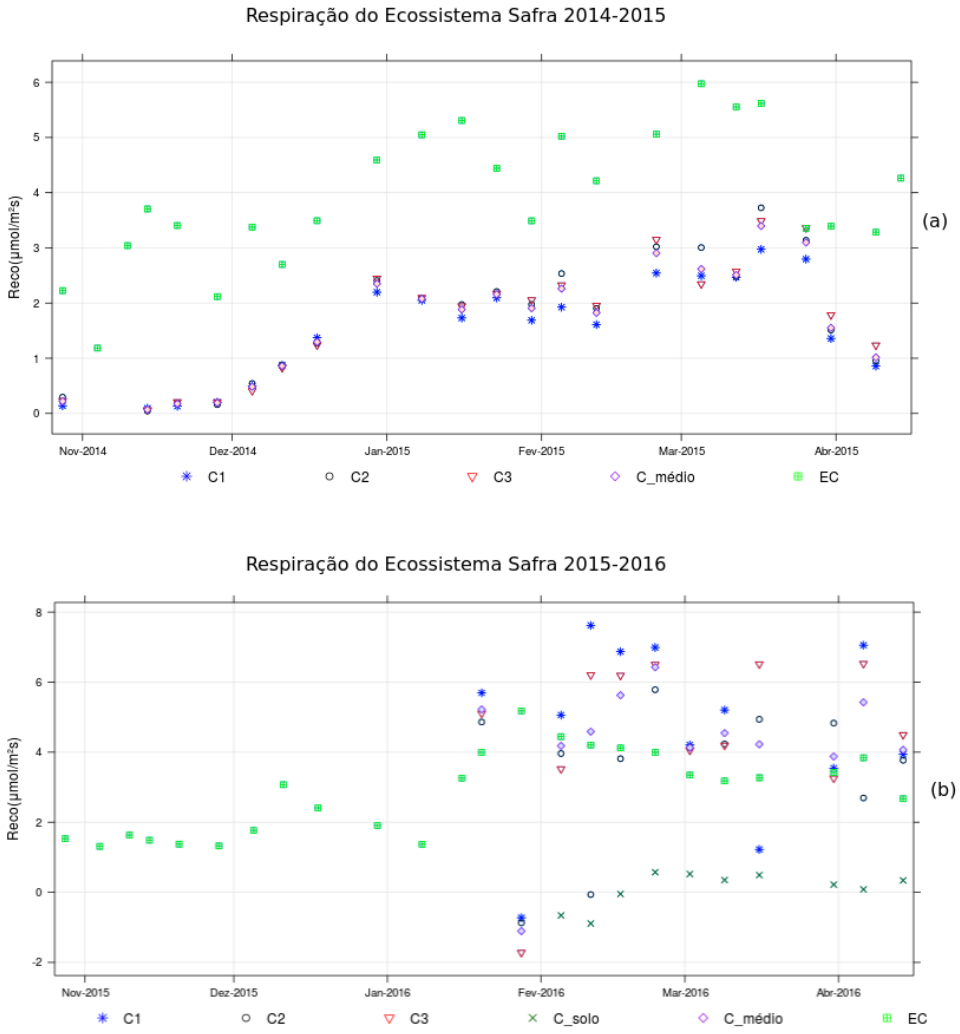
4.3 COMPARAÇÕES DAS EMISSÕES DO ECOSSISTEMA: CÂMARA E TORRE.

A Figura 4.11 apresenta os valores médios diários da respiração do ecossistema obtido através das técnicas de câmara de solo e *Eddy Covariance* para os dias das coletas na câmara. Na Figura 4.11 b nota-se valores negativos de respiração do ecossistema e do solo no início das coletas, que são fisicamente irreais. Esse problema deve ter sido gerado por falhas técnicas, pois o EC resultou valores em torno de 5 $\mu molm^{-2}s^{-1}$. Houve pouca dispersão entre os dados obtidos pelas câmaras de solo na primeira safra (Figura 4.11 a). No entanto, os valores da câmara foram muito menores que a respiração do ecossistema obtida pelo EC, chegando a quase 3 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ de diferença. Para a segunda safra (Figura 4.11 b) os dados da câmara foram mais dispersos, porém, o EC ficou entre esses valores. Na segunda safra também foram coletado dados em solo nu, para tanto a respiração não teve grandes variações temporais ficando com valores em torno de 0,5 $\mu molm^{-2}s^{-1}$.

A Figura 4.12 apresenta os valores médios diários do fluxo de metano obtido através das técnicas de câmara de solo e *Eddy Covariance* para os dias das coletas na câmara. Da mesma forma que para a respiração do ecossistema as câmaras apresentaram maior dispersão entre os dados de CH_4 na segunda safra (Figura 4.12 b). Na primeira safra

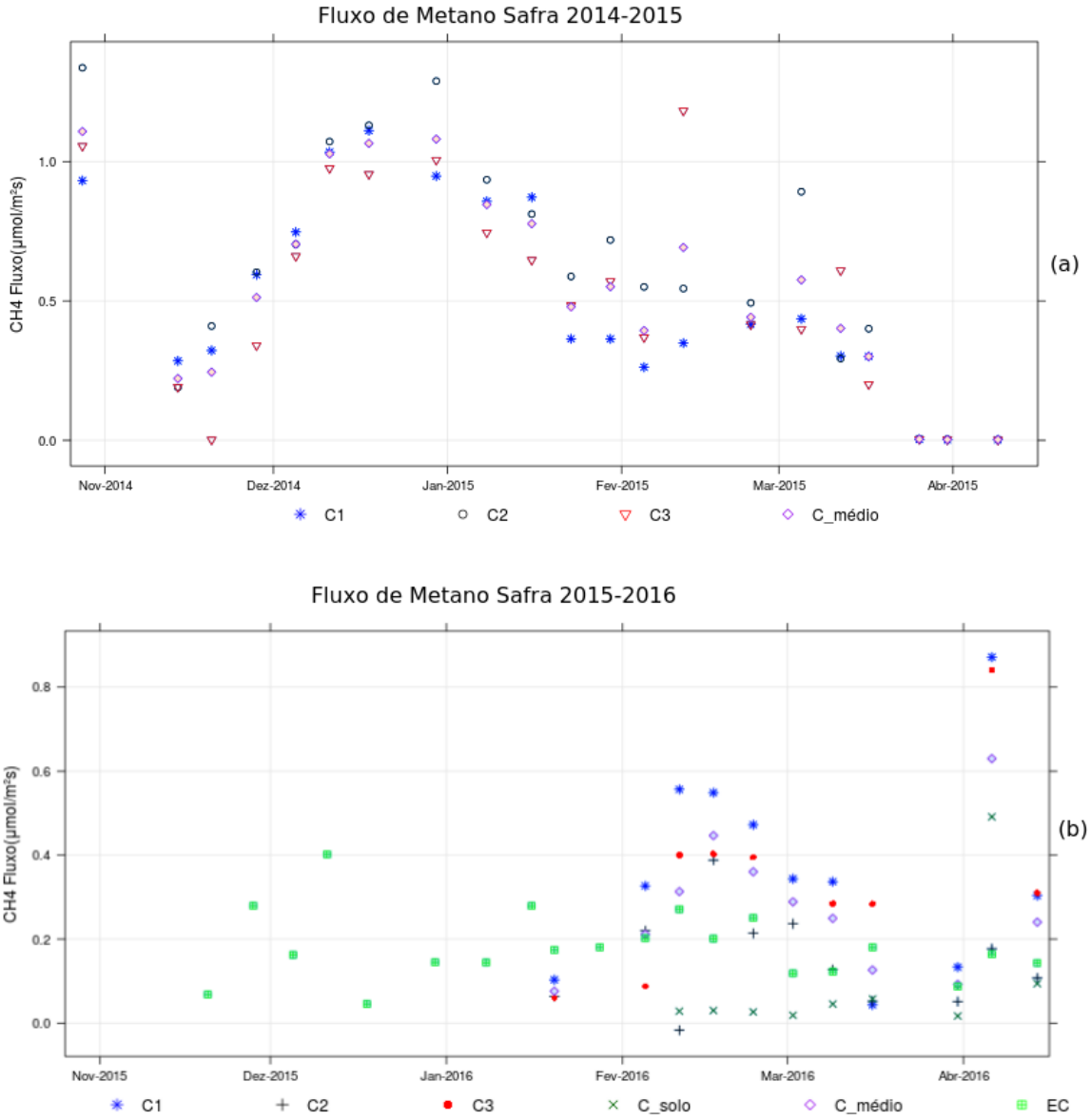
(Figura 4.12 a) nota-se um aumento do fluxo de CH_4 entre dezembro e janeiro e posterior diminuição até que entre fevereiro e março os valores foram em média 0,5 $\mu molm^{-2}s^{-1}$. Na segunda safra tivemos coleta das câmara apenas entre final de janeiro até abril. Nesse período o valor médio foi em torno de 0,2 $\mu molm^{-2}s^{-1}$. Esses valores são menores em aproximadamente 0,3 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ que os encontrados na primeira safra. Na segunda safra também foram coletado dados da câmara em solo nu, para tanto a emissão de CH_4 não teve grandes variações temporais ficando com valores abaixo de 0,1 $\mu molm^{-2}s^{-1}$, ou seja o cultivo do arroz contribui significativamente para o aumento das taxas de emissão de metano. Os dados de EC e da média das câmaras tiveram uma variação temporal semelhante.

Figura 4.11 – Média diária obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. a) respiração do solo na safra 2014-2015; b) respiração do solo na safra 2015-2016. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C_solo representa o valor na câmara sobre solo nu; C_médio representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC



Fonte: Autor.

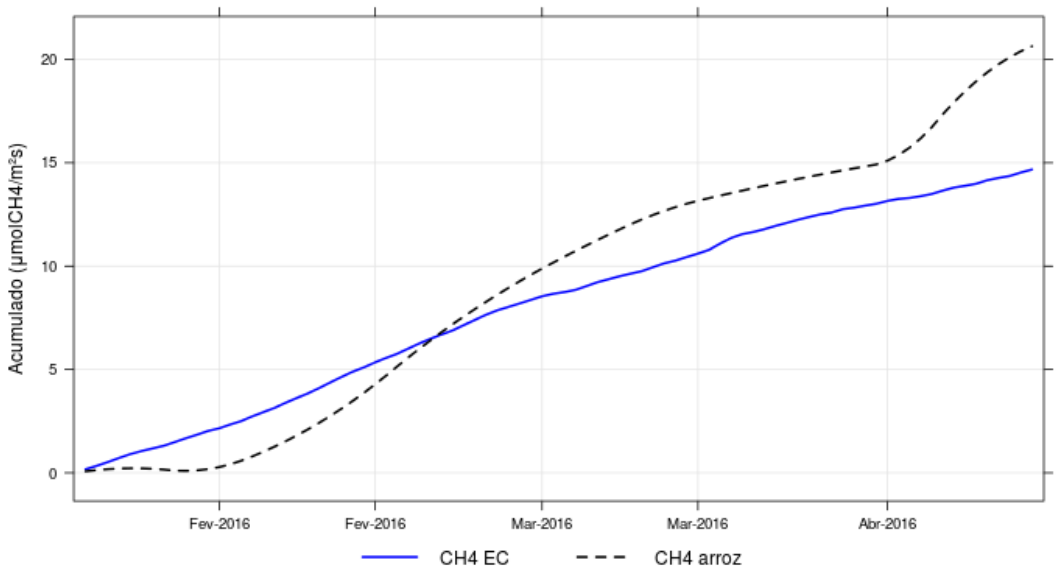
Figura 4.12 – Média diária obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. a) fluxo de metano na safra 2014-2015; b) fluxo de metano na safra 2015-2016. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C_solo representa o valor na câmara sobre solo nu; C_médio representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC



Fonte: Autor.

Yu et al. (2013), comparando emissões de metano por EC e Câmara de solo, obteve uma correlação entre essas medidas de 0,63, o que demonstra que estimativas de ambas as técnicas podem representar o ecossistema. Aqui obtivemos uma correlação de 0,30. Esse menor valor de correlação pode estar ligado ao fato de que estamos comparando média diária de EC com os dados da câmara medido em um horário específico. No entanto, como a câmara de solo não apresenta medidas contínuas, variações devido a agentes climáticos podem subestimar ou superestimar integrações ao longo do ciclo. A comparação das duas técnicas de medida foi estendida para uma integração sazonal onde os dados da câmara foram interpolados linearmente entre as datas da coleta (Figura 4.13). Um total de 14,67 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ (20,27 gCH_4m^{-2}) foi medido pelo EC enquanto 20,64 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ (28,53 gCH_4m^{-2}) foi medido pelas câmaras para o mesmo período (28 de janeiro de 2016 a 14 de abril de 2016, totalizando 77 dias).Isso resultou em uma estimativa de fluxo acumulado 40,69% maior pela câmara que pelo EC. Num estudo similar Meijide et al. (2011) encontrou uma superestimativa das câmaras de solo em 30% que do EC.

Figura 4.13 – Integração sazonal do fluxo de metano através da câmara de solo (CH4 arroz) e *eddy covariance* (CH4 EC) no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de janeiro de 2015 á 14 de abril de 2016.



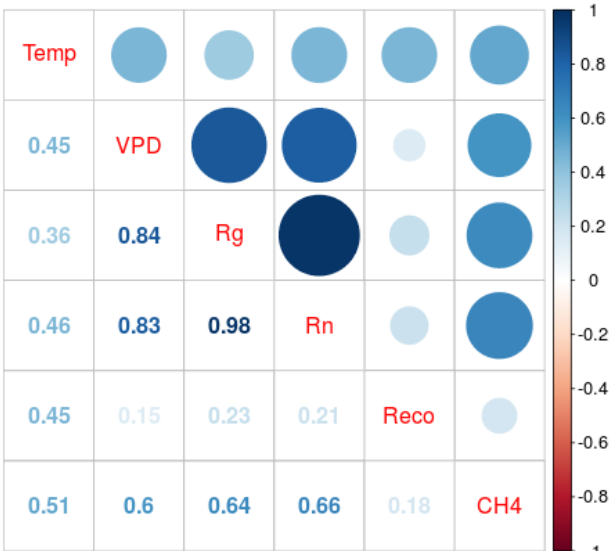
Fonte: Autor.

4.4 MECANISMOS QUE CONTROLAM AS EMISSÕES DE METANO

A Figura 4.14 mostra estatisticamente a dependência entre a temperatura do ar (Temp), o deficit de pressão de vapor (VPD), a radiação global (Rg), o balanço de energia

(Rn), e a respiração do ecossistema (Reco) com a geração de metano para todo o período do cultivo de uma lavoura de arroz irrigado por inundação. A correlação entre o fluxo de CH4 com essas variáveis, mostrou maior dependência do Rn com a produção de CH_4, apresentando um coeficiente de correlação de 0,66. Em seguida vem o Rg com 0,64, VPD com 0,60 e a temperatura do ar com 0,51. A respiração do solo Reco com 0,18, mostrou praticamente nenhuma ligação com o processo de geração do metano. Esses valores podem ser melhor interpretados ao observar Figura 4.15. Embora o fluxo de metano apresente melhor correlação com Rn, esta está totalmente correlacionado com Rg (correlação de 0.98). Assim usaremos apenas Rg para descrever a correlação com o fluxo de CH_4. Na Figura 4.15 observa-se que a relação linear entre as variáveis Rg, Temp e VPD pode descrever o fluxo de CH_4 com baixo coeficiente de determinação (R^2 sempre menor que 0.5), principalmente devido ao grande espalhamento do fluxo de CH_4 com as variáveis atmosféricas.

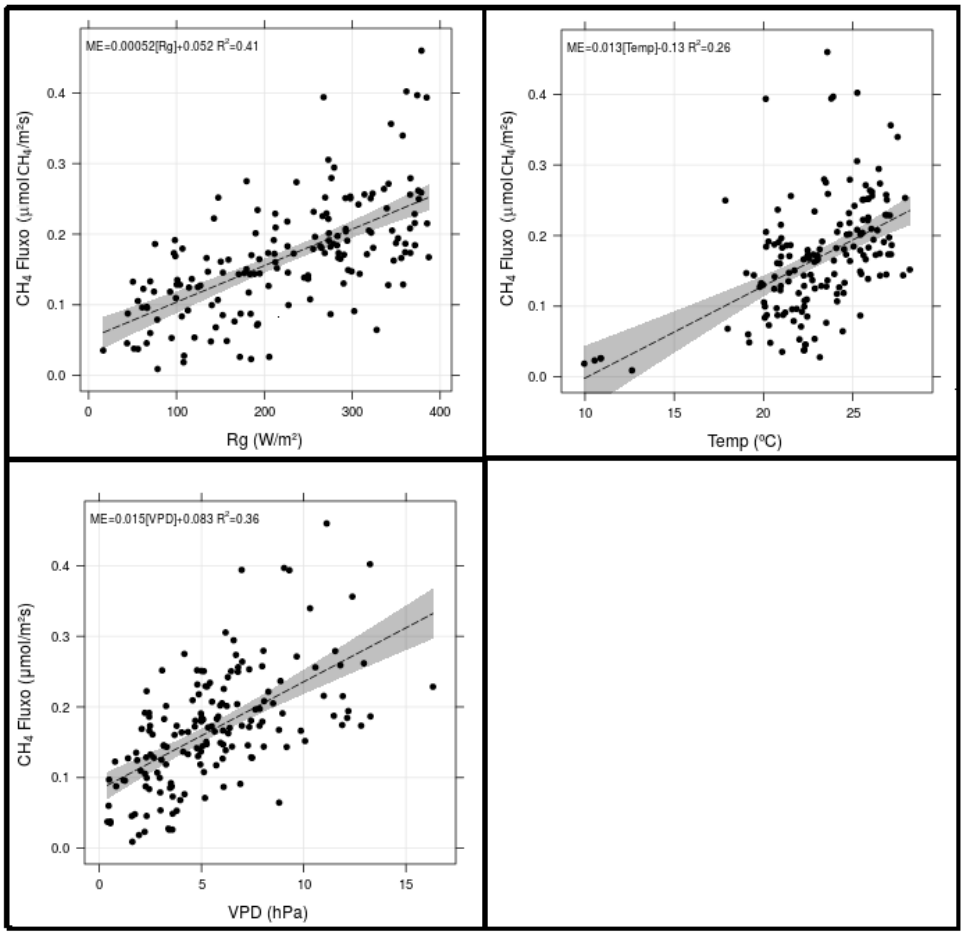
Figura 4.14 – Representação da estatística entre o fluxo de metano e as variáveis: Temp, VPD, Rg, Rn e Reco no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016.



Fonte: Autor.

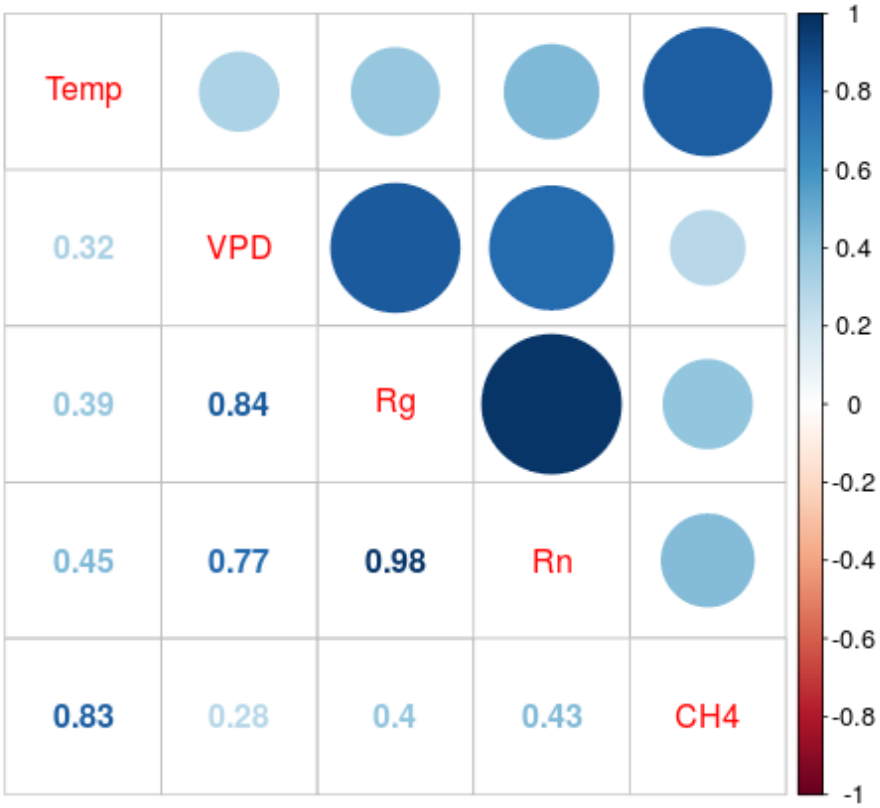
Quando essas análises são realizadas apenas com dados após o fechamento do dossel até o período próximo da maturação (Figura 4.16), as correlações entre as variáveis meteorológicas e o fluxo de metano mostram uma inversão nos valores, tornando a temperatura do ar a variável com maior coeficiente de correlação (0,83) seguido pela Rn (0,43), Rg (0,40) e VPD (0,28). Isso indica a necessidade de particionar as análises dos dados de metano de acordo com os estágios fenológicos da lavoura.

Figura 4.15 – Representação da estatística entre o fluxo de Metano e as variáveis: Temp, VPD, Rg e Reco no sítio experimental de Cachoeira do Sul de 20 de novembro de 2015 a 30 de abril de 2016.



Fonte: Autor.

Figura 4.16 – Representação da estatística entre o fluxo de Metano e as variáveis: Temp, VPD, Rg e Reco no sítio experimental de Cachoeira do Sul para o período de dossel fechado.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho a respiração do ecossistema e a dinâmica das trocas de metano entre o arroz irrigado por alagamento e a atmosfera foram investigadas em um sítio experimental no sul do Brasil. São utilizadas duas técnicas de estimativa de fluxos superficiais: *Eddy Covariance* e Câmara de solo. Os dados foram obtidos sobre uma lavoura de arroz irrigado por inundação no município de Cachoeira do Sul no período de 01 de outubro de 2014 á 30 de abril de 2016 expecificamente para as extimativas dos fluxos de metano e o período de 01 de outubro de 2014 a 30 de abril de 2016 para a respiração do ecossitema.

A emissão de metano apresentou valores similares a diversos estudos. A emissão total de metano no arroz irrigado na safra de 2015-2016 (14 de novembro de 2015 a 16 de abril de 2016) foi de 35,7 gCH_4m^{-2}. Realizando as estatisticas com os dados de toda a safra do arroz, a radiação solar Rg é o forçante meteorológico que mostrou maior correlação com o fluxo de metano, seguido do VPD e da temperatura, porém, utilizando os mesmos métodos de análises com dados obtidos apartir do dossel fechado até próximo da maturação, a temperatura do ar mostrou-se o forçante meteorológico maior correlação com o fluxo de metano, seguido da Rg e VPD. A técnica da câmara de solo obteve emissões de CH_4 uma ordem de grandeza menor para área alagada sem o cultivo do arroz com relação a área com plantas, mostrando que a cultura do arroz potencializa a emissão de metano. As emissões de metano obtidas pela técnica de câmara de solo superestimaram com relação a técnica de o *eddy covariance*. A respiração do ecossistema mostrou que a cultura do arroz atua como um bom sumidouro de dióxido de carbono.

Nesse sentido, o cultivo de arroz mostrou grande influência na emissão de metano, sendo necessário a realização de pesquisas que mitiguem a produção de metano no cultivo de arroz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUBINET, M. Eddy covariance co2 flux measurements in nocturnal conditions: an analysis of the problem. **Ecological Applications**, Wiley Online Library, v. 18, n. 6, p. 1368–1378, 2008.

AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. **Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

BALDOCCHI, D. et al. The challenges of measuring methane fluxes and concentrations over a peatland pasture. **Agricultural and forest meteorology**, Elsevier, v. 153, p. 177 – 187, 2012.

____. Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 82, n. 11, p. 2415, 2001.

BALDOCCHI, D. D.; HINCKS, B. B.; MEYERS, T. P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, Wiley Online Library, v. 69, n. 5, p. 1331–1340, 1988.

CARMELITA, A. R. et al. Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. **Field Crops Research**, Elsevier, v. 160, p. 12 – 21, 2014.

CARNEIRO, J. V. Estimativas das trocas líquidas de carbono em duas áreas de cultivo de arroz irrigado na região central do rs. 2012.

CLIMATEMPO. **Adeus, El Niño**. 2016. Acesso em 23 agosto. 2016. Disponível em: <http://www.climatempo.com.br/noticia/2016/06/03/adeus-el-nino-3703>.

CONAB. **Perspectivas para a agropecuária**: Home. Brasília, 2014. Acesso em 15 fevereiro. 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>.

____. **A cultura do arroz**: Companhia nacional de abastecimento. Brasília, 2015. Acesso em 15 fevereiro. 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_03_01_16_56_00_a_cultura_do_arroz_-_conab.pdf/>.

COSTA, F. de S. et al. Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no sul do brasil. **Ciencia rural**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 38, n. 7, p. 2049 – 2053, 2008.

DIAZ, M. B. **Análise de diferentes métodos de preenchimento de falhas nos fluxos de CO_2: estimativas sobre o arroz irrigado**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria, 2014.

GEF-UFSM. **Grupo de Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Maria**: Home. Santa Maria, 2014. Acesso em 23 Abril. 2016. Disponível em: <http://www.ufsm.br/gef/Moderna/moderna08.pdf/>.

GOMES, F. d. S. C. J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 36, n. 2, 2006.

HATALA, J. A. et al. Greenhouse gas (co 2, ch 4, h 2 o) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the sacramento-san joaquin delta. **Agriculture, ecosystems & environment**, Elsevier, v. 150, p. 1–18, 2012.

IPCC. Climate change 2007: synthesis report. summary for policymakers. In: **Climate change 2007: synthesis report. Summary for policymakers**. [S.l.]: IPCC, 2007.

____. Climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 2013.

KRAUSS, K. W. et al. Component greenhouse gas fluxes and radiative balance from two deltaic marshes in louisiana: Pairing chamber techniques and eddy covariance. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Wiley Online Library, 2016.

LASSLOP, G. et al. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. **Global Change Biology**, Wiley Online Library, v. 16, n. 1, p. 187–208, 2010.

LIMA, M. d.; PESSOA, M.; LIGO, M. Emissões de metano da pecuária. **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência. Embrapa: Brasília**, 2002.

LIOU, K.-N. **An introduction to atmospheric radiation**. [S.l.]: Academic press, 2002. v. 84. 583 p.

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

MEIJIDE, A. et al. Seasonal trends and environmental controls of methane emissions in a rice paddy field in northern italy. **Biogeosciences**, Copernicus GmbH, v. 8, n. 12, p. 3809–3821, 2011.

MORAES, O. L. de. **METEOROLOGIA e POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA: teoria, experimentos e simulação**. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2010. 240 p.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. [S.l.]: Routledge, 2002.

OLIVEIRA, L. L. de; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. **Meteorologia fundamental**. [S.l.]: Edifapes, 2001. 432 p.

OLIVEIRA, P. E. S. de. **Trocas turbulentas de escalares acima e no interior de uma floresta de araucária no sul do Brasil**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria, 2011.

PETTY, G. W. **A first course in atmospheric radiation**. Madson: Sundog Pub, 2006. 459 p.

SCHLESINGER, W. H. **Biogeochemistry: An Analysis of Global Change**. [S.l.]: Academic press, 1997. 588 p.

SCHRIER-UIJL, A. et al. Comparison of chamber and eddy covariance-based co 2 and ch 4 emission estimates in a heterogeneous grass ecosystem on peat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 150, n. 6, p. 825–831, 2010.

SENA, J. C. L. Estudo das componentes do balanço de energia em uma cultura de arroz irrigado no sul do brasil. 2012.

SILVA, L. S. da; GRIEBELER, G.; FREIRE, D. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado no sul do brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 35, n. 2, p. 473–481, 2011.

SOCIETY, A. C. **Química para um Futuro Sustentável**. [S.l.]: AMGH Editora LTDA, 2016. v. 8. ed.

SOLOS, E. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Rio de Janeiro**, v. 412, 1999.

SOUZA, V. d. A. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração em uma cultura de arroz irrigado. 2013.

STULL, R. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Madson: Kluwer Academic Publishers, 1988. 666 p.

TEICHRIEB, C. A. **Trocas de carbono atmosférico sobre dois diferentes sistemas de plantio de milho no sul do Brasil**. 2012. 105 f. Tese (Doutorado em Física) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TILMAN, D. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 96, n. 11, p. 5995–6000, 1999.

TSENG, K.-H. et al. Determination of methane and carbon dioxide fluxes during the rice maturity period in taiwan by combining profile and eddy covariance measurements. **Agricultural and forest meteorology**, Elsevier, v. 150, n. 6, p. 852–859, 2010.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. [S.l.]: Academic press, 2006. v. 92.

WUEBBLES, D. J.; HAYHOE, K. Atmospheric methane and global change. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 57, n. 3, p. 177 – 210, 2002.

YU, L. et al. A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in tibetan plateau alpine wetland. **Environmental pollution**, Elsevier, v. 181, p. 81–90, 2013.

ANEXO A – METANO E OUTROS GASES DE EFEITO ESTUFA

3.8 Metano e outros gases de efeito estufa

As preocupações referentes ao efeito de estufa ampliado baseiam-se principalmente no aumento das concentrações de CO_2 atmosférico. Entretanto, outros gases também têm um papel nisso. Metano, óxido nitroso, clorofluorocarbonetos e até ozônio participam do aquecimento da atmosfera.

Os valores do potencial de aquecimento global, ainda que úteis para comparação, devem ser tomados como aproximações.

Nosso nível de preocupação com relação a esses gases tem relação com sua concentração na atmosfera mas também com outras características importantes. O **tempo de vida atmosférico global** caracteriza o tempo necessário para que um gás adicionado à atmosfera seja removido. Também é conhecido como o "tempo de residência". Os gases de efeito estufa também têm diferentes efetividades na absorção de radiação infravermelha, o que é quantificado pelo **potencial de aquecimento global (GWP)**, um número que representa a contribuição relativa de uma molécula do gás atmosféri-

Material com direitos autorais

TABELA 3.3 Exemplos de gases de efeito estufa

Nome (fórmula química)	Concentração pré-industrial (1750)	Concentração em 2011	Tempo de vida atmosférico (anos)	Fontes antropogênicas	Potencial de aquecimento global
dióxido de carbono CO_2	270 ppm	396 ppm**	50-200*	Queima de combustíveis fósseis, desmatamento, produção de cimento	1
metano CH_4	700 ppb	1.816 ppb	12	Arrozais, depósitos de lixo, gado	21
óxido nitroso N_2O	275 ppb	324 ppb	120	Fertilizantes, produção industrial, combustão	310
CFC-12 CCl_2F_2	0	0,53 ppb	102	Refrigerantes líquidos, espumas	8100

*Um valor único para o tempo de vida atmosférico do CO_2 não é possível. Os mecanismos de remoção ocorrem em velocidades diferentes. A faixa apresentada é uma estimativa baseada em vários mecanismos de remoção.
**O valor para o dióxido de carbono é de 2012 e superou 400 ppm em vários lugares durante 2013.

co para o aquecimento global. Ao GWP do dióxido de carbono é atribuído o valor 1. Os demais gases de estufa são indexados a essa referência. Gases com tempos de vida curtos, como vapor de água, ozônio da troposfera, aerossóis da troposfera e outros poluentes ambientais, não são distribuídos de forma homogênea pelo planeta. É difícil quantificar seu efeito, logo eles não recebem, usualmente, valores de GWP. A Tabela 3.3 lista quatro gases de efeito estufa, sua fonte principal e suas propriedades importantes para o debate sobre a mudança do clima.

Ilustração A.1 – Tempo de vida e o potencial de aquecimento de determinados gases de efeito estufa.

Fonte: Retirado de Society (2016, p. 130-131).