

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GIORDANA TRINDADE DE ABREU

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS TROCAS DE DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE
UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL**

Alegrete

2023

GIORDANA TRINDADE DE ABREU

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS TROCAS DE DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE
UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação Stricto sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Denardin Costa
Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a. Débora Regina Roberti

Alegrete

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A162e Abreu, Giordana

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS TROCAS DE DIÓXIDO DE CARBONO
SOBRE UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO
BRASIL / Giordana Abreu.

52 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2023.

"Orientação: Felipe Costa".

1. CO2. 2. fluxos turbulentos. 3. arroz irrigado. I.
Título.

GIORDANA TRINDADE DE ABREU

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS TROCAS DE DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO NO SUL DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Materiais e meio Ambiente

Dissertação defendida e aprovada em: 09, de agosto de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Felipe Denardin Costa

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr^a. Débora Regina Roberti

Coorientadora

UFSM

Prof. Dr. Cristiano Maboni

UFPeI



Assinado eletronicamente por **FELIPE DENARDIN COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/11/2023, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Debora Regina Roberti, Usuário Externo**, em 17/11/2023, às 15:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIZ EDUARDO MEDEIROS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/11/2023, às 13:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Cristiano Maboni, Usuário Externo**, em 18/11/2023, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1303563** e o código CRC **8D448FB0**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus, por tornar tudo isso possível e pela fé nos dias difíceis.

Ao meu companheiro de todas as horas, Manoel, pela compreensão e apoio em todos os momentos.

A minha mãe, Alcidia Gedel Trindade, e ao meu pai Jarbas Vieira de Abreu, por acreditarem em mim e proporcionarem a estrutura necessária.

Aos demais familiares que, também, contribuíram durante o período de construção deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Felipe Denardin Costa, pela confiança, apoio, aprendizado e incentivo durante todo o mestrado.

À professora Dr.^a Débora Regina Roberti pela orientação e dedicação no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao pessoal do Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em especial ao Aleksander Mergen e a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), pela oportunidade de estudo, e à UFSM por autorizar a utilização das instalações para a realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro com a provisão da bolsa de mestrado.

RESUMO

A agricultura Brasileira é reconhecida como um dos setores mais fundamentais para economia do Brasil. No entanto, a agricultura é uma importante fonte de gases do efeito estufa, respondendo por cerca de 75 % das emissões de CO₂, 91 % das emissões de CH₄ e 94 % das emissões de N₂O no país. Nestas estimativas, o arroz irrigado por inundação tem uma importante contribuição. O objetivo deste estudo é comparar as estimativas de fluxo de dióxido de carbono (CO₂) entre o arroz irrigado por alagamento e a atmosfera em uma lavoura de arroz irrigado no Sul do Brasil, no município de Cachoeira do Sul. São utilizadas duas técnicas de estimativa de fluxos superficiais de CO₂ pela respiração do ecossistema: Eddy Covariance (EC) e câmara de solo. Quando comparadas as técnicas, os valores acumulados de CO₂ no arroz irrigado, obtidos pela câmara de solo, foram entre 30 e 60 % superiores aos obtidos pela EC. Este estudo permite conhecer a dinâmica trocas de CO₂ no cultivo de arroz irrigado por inundação no sul do Brasil.

Palavras-chave: CO₂. Arroz irrigado. Fluxos turbulentos.

ABSTRACT

Brazilian agriculture is recognized as one of sectors most fundamental to the Brazilian economy. However, agriculture is an important source of greenhouse gases, accounting for 75 % of CO₂ emissions, 91 % of CH₄ emissions and 94 % the emissions of N₂O no country. In these estimates, the irrigated rice paddy makes an important contribution. The objective of this study is to compare the estimates of carbon dioxide flux (CO₂) between the irrigated rice paddy and the atmosphere in a farm in southern Brazil, municipality of Cachoeira do Sul. Two techniques for estimating surface CO₂ fluxes are used for ecosystem respiration: Eddy Covariance (EC) and solo chamber. When comparing the techniques, the accumulated values of CO₂ in irrigated rice, obtained by the soil chamber, were between 30 and 60 % higher than those obtained by EC. This study allows us to understand the dynamics of CO₂ exchanges in flood-irrigated rice cultivation in southern Brazil.

Keywords: Carbon dioxide. Irrigated rice. turbulent flux

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medidas de anomalia de temperatura global e dados da concentração de CO ₂ coletados no sítio Law Dome na Antártica.	20
Figura 2 – Representação do transporte vertical de duas parcelas de ar C_1 e C_2 em um único ponto, provocado por dois turbilhões com velocidade w_1 e w_2 , respectivamente, em dois instantes de tempo distintos.	21
Figura 3 – Ilustração do método da câmara de solo fechada. 24	
Figura 4 – Localização do sítio experimental no mapa.	26
Figura 5 – Localização da inundação por parcelas entre canais de drenagem.	27
Figura 6 – Torre micrometeorológica do sítio de Cachoeira do Sul. Visão do anemômetro sônico e dos analisadores de gás para o sistema Eddy Covariance.	28
Figura 7 – Foto das câmaras de solo instaladas no sítio experimental de Cachoeira do Sul. Na esquerda, câmara sob solo nu (Fig. 7a); na direita, câmara de solo fechada (Fig. 7b).	30
Figura 8 – Média diária das variáveis meteorológicas no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016: Temperatura do ar (painel superior), déficit de pressão de vapor (painel do meio) e radiação global (painel inferior).	32
Figura 9 – Média mensal da precipitação no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 e 30 de abril de 2016.	33
Figura 10 – Fig. 10a Troca Líquida do Ecossistema (NEE), Fig. 10b Produção primária bruta (fotossíntese), do inglês Gross primary production (GPP), Fig. 10c Respiração do Ecossistema (Reco) e Fig. 10d concentração de CO ₂ no sítio experimental de Cachoeira do Sul.	35
Figura 11 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas demarcadas representam as safras de arroz. ...	36
Figura 12 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas hachuradas representam as safras de arroz.	37
Figura 13 – Média diária do NEE (Fig. 13a) e da concentração de CO ₂ (Fig. 13b) no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016.	38
Figura 14 – NEE e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016.	39
Figura 15 – NEE e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016.	40

Figura 16 – Comportamento médio durante o ciclo diurno da Troca Líquida do ecossistema de CO ₂ (NEE) (Fig. 16a), da produção primária bruta (fotossíntese) (Fig. 16b), da Respiração do Ecossistema (Reco) (Fig. 16c) e da concentração de CO ₂ (Fig. 16d).	41
Figura 17 – Comportamento médio para um ciclo diurno no período entre 01 de maio de 2014 e 30 de abril de 2016 das variáveis: NEE (Fig. 17a), respiração do ecossistema (Fig. 17b) e temperatura do ar (Fig. 17c) no sítio experimental de Cachoeira do Sul.	42
Figura 18 – Média diária da respiração do solo na safra 2014-2015, obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C _{solo} representa o valor na câmara sobre solo nu; C _{medio} representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC.	43
Figura 19 – Média diária da respiração do solo na safra 2015- 2016, obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C _{solo} representa o valor na câmara sobre solo nu; C _{medio} representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC.	44
Figura 20 – Média diária acumulada de CO ₂ , obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul nas safras 2014- 2015	45
Figura 21 – Média diária acumulada de CO ₂ , obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul nas safras 2015- 2016	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Instrumentação e medidas da torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul.....	28
------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS

<i>C</i>	Carbono
<i>CFC_s</i>	Clorofluorcarbonos
<i>CH₄</i>	Metano
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>CLA</i>	Camada limite Atmosférica
<i>CLC</i>	Camada limite Convectiva
<i>CLE</i>	Camada limite Estável
<i>CLN</i>	Camada Limite Noturna
<i>CLP</i>	Camada Limite Planetária
<i>CR</i>	Camda Residual
<i>CS</i>	Camada Superficial
<i>EC</i>	Método Eddy Coraviance
<i>EUA</i>	Estados Unidos da América
<i>GEE</i>	Gás de Efeito Estufa
<i>GPP</i>	Produção Primária Bruta
<i>H₂O</i>	Água
<i>N₂</i>	Nitrogênio
<i>NEE</i>	Troca Líquida do Ecossistema
<i>N₂O</i>	Óxido Nitrogênio
<i>O₃</i>	Ozônio
<i>LUT</i>	look-up table
<i>MDS</i>	Marginal distribution sampling
<i>MDV</i>	Mean diurnal variation
<i>NLR</i>	Regressão não linear
<i>UFMS</i>	Universidade Federal de Santa Maria

UNIPAMPA Universidade Federal do Pampa

Reco Respiração

RS Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Razão de Bowen
C_1	Transporte Vertical parcela 1
C_2	Transporte Vertical parcela 2
E_0	Parâmetro que caracteriza a sensibilidade da respiração à temperatura
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo turbulento de calor sensível
H^*	Fluxo turbulento de calor sensível corrigido
L	Radiação de onda longa
L_{\downarrow}	Radiação de onda longa incidente
L_{\uparrow}	Radiação de onda longa emitida
LE	Fluxo turbulento de calor latente
LE^*	Fluxo turbulento de calor latente corrigido
K	Radiação de onda longa incidente
K	Radiação de onda curta incidente
r_b	Respiração na temperatura de referência
Rn	Saldo de radiação
T_0	Temperatura mantido constante
T_{ref}	Temperatura de referência
w_1	Velocidade no primeiro instante de tempo
w_2	Velocidade no primeiro instante de tempo
\bar{w}	Escoamento médio vertical
ρ_a	Densidade do ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Camada Limite	17
2.1.1	Camada limite convectiva	17
2.1.2	Camada limite estável	17
2.1.3	Camada limite residual	18
2.1.4	Camada superficial	18
2.2	Balanço de Energia	18
2.3	Dióxido de carbono CO ₂ na atmosfera	19
2.4	Medidas da emissão superficial de gás de efeito estufa	20
2.4.1	Covariância dos vórtices turbulentos: Técnica Eddy Covariance (EC)	21
2.5	Preenchimento de falhas	22
2.6	Particionamento do NEE	23
2.6.1	Método da câmara de solo	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Descrição do local	25
3.2	Medidas em torre micrometeorológica	27
3.3	Processamento de dados	29
3.3.1	Software de processamento de dados e estimativa dos fluxos	29
3.3.2	Câmara de solo	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Condições ambientais	31
4.2	Fluxos atmosféricos	33
4.3	Ciclo diurno	40
4.4	Comparações das emissões de CO ₂ através do método da câmara de solo e método Eddy Covariance	42
5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

A agricultura Brasileira é reconhecida como um dos setores fundamentais para a economia do Brasil, sendo ela uma das que mais contribui para o crescimento do PIB nacional, respondendo por 21% da soma de todas as riquezas produzidas (EMBRAPA, 2015). Sua importância também está ligada diretamente com a necessidade de alimentos para a população, bem como matéria-prima para o setor de vestimentas e setor animal. Em razão de sua necessidade em vários setores da economia, o seu crescimento é inevitável. No entanto, há uma crescente preocupação em relação às emissões e absorções de gases de efeito estufa associadas a esse setor de produção. A partir do conhecimento que uma das principais causas antrópicas do aquecimento global são as emissões dos gases de efeito estufa (GEE), a importância em quantificar as taxas de emissões e absorções dos gases é de extrema necessidade para identificar e entender os processos que geram esses gases e seus fatores controladores (MATOS et al., 2017). No contexto atual de mudanças climáticas e preocupações ambientais, torna-se cada vez mais importante compreender o fluxo de CO₂ em diferentes ecossistemas, especialmente aqueles relacionados à agricultura. Estima-se que no Brasil a agricultura contribui com aproximadamente 75% das emissões de CO₂, 91% das emissões de CH₄ e 94% das emissões de N₂O, considerando também a conversão de áreas florestais para uso agrícola (BAYER et al., 2011).

A cultura de arroz irrigado por inundação é uma prática comum no Brasil, a qual contribui significativamente para a segurança alimentar e a economia regional. Devido à importância para o país, o crescimento de lavouras tem sido necessário nas últimas décadas, gerando empregos tanto no campo como em indústrias de grão, fabricantes de máquinas agrícolas, entre outros, bem como gerando algumas preocupações para o meio ambiente. A procura de altas produções, rentabilidade, qualidade e menores perdas na produção, fez com que produtores tivessem uma maior preocupação no aperfeiçoamento de sua produtividade, procurando novas tecnologias, manejo e conservação, solos adequados e melhoramento genético de suas sementes. Juntamente com os benefícios que estas melhoras trouxeram para o setor agrícola, algumas práticas como a monocultura (cultivo de uma única espécie vegetal), estão associadas a diversos impactos ambientais, como o empobrecimento do solo, a retirada da cobertura vegetal e o desequilíbrio ecológico.

Nesse sentido, o estudo das emissões e absorções, ou seja, do balanço de CO₂ sobre uma cultura de arroz irrigado por inundação no sul do Brasil ganha relevância, devido à importância econômica e ambiental dessa cultura na região. O CO₂ na natureza é produzido no solo decorrente da respiração radicular, nos microrganismos e na decomposição química dos compostos de carbono (LUNDEGÅRDH, 1927). De acordo com (RAICH; SCHLESINGER, 1992), esse processo de emissão do solo para a atmosfera é conhecido como efluxo de CO₂ do solo. Conhecendo que a produtividade agrícola tende a acrescentar uma maior disponibilidade de resíduos orgânicos a serem decompostos, há também

uma tendência de aumentar o fluxo de CO₂ do solo (FERREIRA; RESCK; GOMES, 2005).

Em geral, são utilizadas diversas metodologias de avaliação dos fluxos de GEE do solo para a atmosfera (DUIKER; LAL, 2000; JANSSENS; KOWALSKI; CEULEMANS, 2001; POST et al., 2001; YIM; JOO; NAKANE, 2002), dentre as quais o método da câmara de solo e covariância dos vórtices (do inglês Eddy Covariance, EC).

A metodologia EC permita realizar medidas contínuas por longo período, o que não é possível através do método da câmara de solo. No entanto, no EC é necessário utilizar critérios de qualidade nos dados devido à variabilidade diurna e à fraca intensidade turbulenta durante a noite (JANSSENS; KOWALSKI; CEULEMANS, 2001). Todavia, diversos estudos recentes têm mostrado que estimativas de fluxos através da covariância dos vórtices são confiáveis (RETH; GÖCKEDE; FALGE, 2005; MABONI et al., 2021; MURPHY et al., 2022) e que a incerteza das medidas pode, inclusive, ser menor que nas medidas de câmara do solo (MURPHY et al., 2022).

Compreender a dinâmica das trocas e investigar a resposta dos fluxos de CO₂ com as condições meteorológicas e biofísicas, que ocorrem entre o arroz irrigado por alagamento e a atmosfera em uma lavoura de arroz irrigado, já foram objetivos aprofundados em trabalhos anteriores de (DIAZ et al., 2018) e (MABONI et al., 2016). Este trabalhos foram realizados em cultivo de arroz irrigado por inundação no município de Cachoeira do Sul - RS. (DIAZ et al., 2018) utilizaram a técnica Eddy Covariance com foco nas trocas líquidas de CO₂ e H₂O, enquanto (MABONI et al., 2016) utilizaram duas técnicas de estimativa de fluxos superficiais de CH₄: Eddy Covariance e Câmara de solo.

Nesse contexto, o presente trabalho vem com o intuito de complementar trabalhos já existentes, utilizando a mesma área experimental com dados coletados entre 2014 e 2016, aplicando as metodologias de Eddy Covariance e o método da câmara de solo. Os fluxos de CO₂ obtidos pelo Eddy Covariance for particionados entre absorção de CO₂ pela fotossíntese (GPP ou produção primária bruta) e a emissão através da respiração do ecossistema. Portanto, o presente trabalho tem como principal objetivo comparar as estimativas de fluxo de CO₂ para a respiração do ecossistema no arroz irrigado por alagamento pelas metodologias Eddy Covariance e câmara de solo. Além disso, o presente estudo busca compreender a dinâmica das trocas de CO₂ entre o arroz irrigado por alagamento e a atmosfera ao longo de todo o ciclo produtivo e anual.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Camada Limite

A atmosfera terrestre pode ser dividida em quatro grandes camadas, em função do gradiente vertical da temperatura, altura e concentrações de gases, sendo elas: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera (SALVADOR, 2014). A camada de grande importância para todos os seres vivos e para os fenômenos meteorológicos que definem o tempo e clima, é a Troposfera, que é a camada mais baixa da atmosfera. A Troposfera estende-se da superfície terrestre até aproximadamente 8 a 18 km de altitude, dependendo da latitude e da época do ano (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001).

A Troposfera, região próxima à superfície, pode ser dividida em duas partes: camada limite atmosférica (CLA), ou camada limite planetária (CLP), e a atmosfera livre. Segundo (STULL, 1988), a CLA é definida como a região da atmosfera impactada pela superfície terrestre e pelos efeitos da presença de solo, devido a trocas verticais de quantidade de movimento, calor e umidade. Com uma altura típica de aproximadamente 1 km, é dominada por movimentos turbulentos gerados por forças mecânicas, como cisalhamento do vento e de empuxo, causadas pelo aquecimento ou resfriamento da superfície.

A Camada Limite Atmosférica é caracterizada pelas diferenças promovidas pelas variações do dia, dando origem ao ciclo diurno da CLA:

2.1.1 Camada limite convectiva

A Camada limite convectiva (CLC) ocorre durante o dia devido aos movimentos de convecção térmica na atmosfera. Possui estratificação térmica instável próximo à superfície, acima dessa há uma região de intensa mistura turbulenta e com estratificação aproximadamente neutra e, acima da camada de mistura, existe uma camada com estratificação estável, com intensa inversão térmica na qual o ar da atmosfera livre é incorporado à CLA, promovendo trocas de calor momentum e umidade entre a atmosfera e a camada limite. Essa fina camada é conhecida como camada de entranhamento (STULL, 1988).

2.1.2 Camada limite estável

A camada limite estável (CLE), ou camada limite noturna (CLN), forma-se pelo resfriamento radiativo da superfície, que ocorre depois do pôr do Sol. Como as camadas de ar adjacentes à superfície são resfriadas por condução, assim, formam uma camada estavelmente estratificada, onde as forças de empuxo, que durante o dia atuam na produção de turbulência, passam a destruir a turbulência. Sendo o cisalhamento do vento a única fonte de turbulência na CLA. É comum que a ordem de grandeza da turbulência seja reduzida em muitas ordens de grandeza, o que impacta no transporte turbulento, além da presença

de turbulência intermitente (MAHRT, 1999).

2.1.3 Camada limite residual

A camada limite residual (CR) se forma a partir do decaimento da CLC, iniciado com o surgimento da CLE. Localizada acima da CLE, a CR apresenta turbulência de fraca intensidade, remanescente da CLC, podendo conter aerossóis e unidades remanescentes do dia anterior (ARYA, 2001).

2.1.4 Camada superficial

A camada superficial (CS) se estende da superfície até aproximadamente 10 m, apesar de não ser uma parte do ciclo da CLA, ela está presente tanto na CLC quanto na CLE. No interior da CS, a variação dos fluxos turbulentos é menor do que 10% de seus valores superficiais e das variáveis médias, tais como magnitude do vento, temperatura potencial e vapor d'água, entre outras, apresentam gradientes dentro dessa região da camada limite (STULL, 1988; ARYA, 2001).

2.2 Balanço de Energia

O balanço de energia leva em consideração a energia disponível através da soma do saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor no solo (G) e os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e calor latente (LE):

$$H + LE = Rn - G, \quad (1)$$

sendo o saldo de radiação em superfície definido como:

$$Rn = (K \downarrow - K \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow). \quad (2)$$

Na Eq. (2), $K \downarrow$ é a radiação de onda curta incidente, $K \uparrow$ é a radiação de onda curta refletida, $L \downarrow$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera e $L \uparrow$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície da terra. A primeira equação, demonstrada acima, representa o balanço de energia. Utiliza-se esse balanço como indicador de acurácia das estimativas pelo método de Eddy Covariance (EC) (WILSON et al., 2001; CULF; FOKEN; GASH, 2004; LEUNING et al., 2005; FOKEN, 2008). É importante destacar que o balanço de energia na superfície, estimado através da EC, não obtém fechamento exato, isso ocorre não por um problema técnico do método, mas sim pela influência de características do local do experimento no fechamento (FOKEN; AUBINET; LEUNING, 2011), por exemplo. Uma forma de realizar o fechamento de energia em superfície é através da distribuição do resíduo do balanço de energia entre o H e o LE . Segundo Twine et al. (2000), pode-se realizar o fechamento utilizando balanço de energia com a correção de H e o LE , através da razão

de Bowen:

$$B = \frac{H}{LE}. \quad (3)$$

A partir da Eq. (3), isolando os termos (H ou LE) e substituindo na Eq. (1), obtém-se as relações corrigidas para os fluxos de calor sensível (H^*) e latente (LE^*):

$$H^* = B \frac{(Rn - G)}{(1 + B)}, \quad (4)$$

e

$$LE^* = \frac{(Rn - G)}{(1 + B)}. \quad (5)$$

2.3 Dióxido de carbono CO₂ na atmosfera

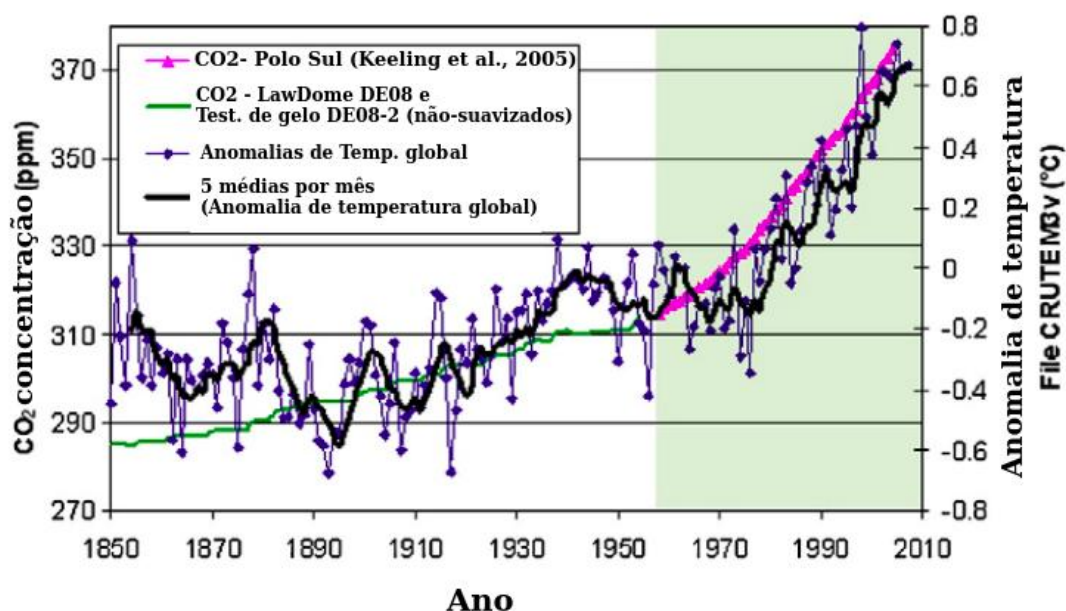
Os principais reservatórios globais, nos quais circula o Carbono (C) são: a atmosfera, os oceanos e os sistemas terrestres. A atmosfera desempenha um papel importante no ciclo do Carbono, por atuar como um condutor entre os outros dois reservatórios. A concentração de CO₂, encontrada na atmosfera, é regida em grande parte pela dinâmica das trocas entre esses três reservatórios (PAUSTIAN et al., 2004). O CO₂, conhecido também como gás carbônico, está ligado diretamente com graves desequilíbrios no efeito estufa do planeta Terra. É um composto químico gasoso que, em condições normais, não apresentam cheiro ou sabor, sendo de difícil detecção. Gerado principalmente pela queima de combustíveis fósseis e pelas queimadas, o CO₂ é ainda um dos gases poluidores mais importantes nas edificações agropecuárias (HOBBS; MISSELBROOK; CUMBY, 1999).

Contudo, o CO₂ é um dos gases do efeito estufa (GEE), juntamente com o metano (CH₄), clorofluorcarbonos (CFCs), óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrogênio (NO e N₂O) e ozônio (O₃) que também estão presentes na atmosfera e que absorvem a radiação de onda longa e fazem com que a superfície terrestre permaneça aquecida. Outro gás considerado um GEE natural que compõe a atmosfera é o vapor d'água (H₂O, em média, 1% do volume) (MACHADO, 2005). A concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera tem aumentado a cada ano em uma porcentagem consideravelmente alta. A exploração dos recursos naturais através da queima de combustíveis fósseis, o desmatamento de áreas florestadas e o crescimento da produtividade de áreas plantadas, fez com que a quantidade de GEE, principalmente o CO₂, aumentasse exponencialmente até os dias de hoje (BAYER et al., 2011). Apesar dos gases, como metano e o óxido nitroso, apresentarem potencial de aquecimento maior que o CO₂, o CO₂ tem maior concentração na atmosfera e é emitido em maiores quantidades devido a essas ações antrópicas (MACHADO, 2005).

2.4 Medidas da emissão superficial de gás de efeito estufa

O trabalho pioneiro de Svante Arrhenius, no final do século XIX, relacionou as concentrações atmosféricas de CO_2 com as variações de temperatura. Ainda que exista forte correlação entre o aumento da concentração de CO_2 com o aumento da temperatura, principalmente a partir dos anos 1980 (Fig. 3), Florides e Christodoulides (2009) sugeriram que o CO_2 pode não ser o único responsável por esse aumento, sendo necessário, por exemplo, melhor compreensão da interação do CO_2 com as plantas. Estudos sobre a influência de outros gases, tais como o CH_4 sobre a temperatura média do planeta também têm sido desenvolvidos atualmente.

Figura 1 – Medidas de anomalia de temperatura global e dados da concentração de CO_2 coletados no sítio Law Dome na Antártica.



Fonte: Adaptado de Florides e Christodoulides (2009).

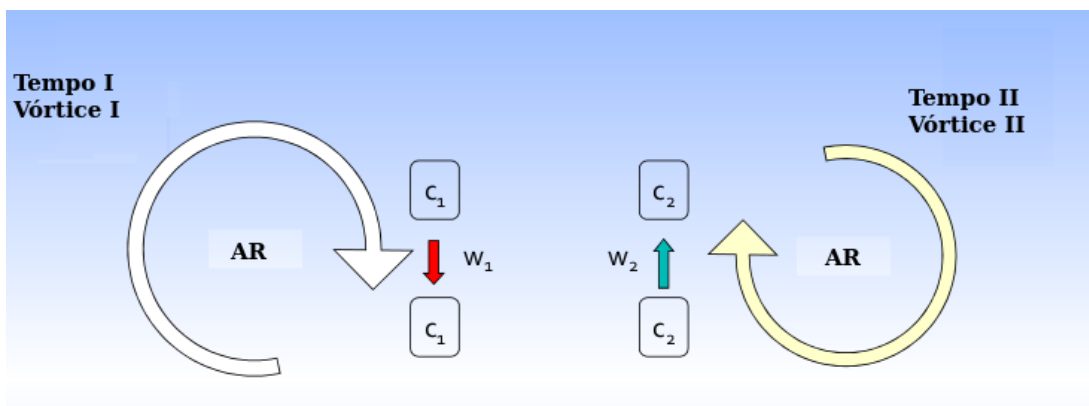
A realização de medições longas e contínuas das concentrações de CO_2 , bem como de outros gases de efeito estufa, são fundamentais para o estudo da dinâmica regional e global dos gases de efeito estufa e suas evoluções e interações com o ambiente (ZELLWEGGER et al., 2016). Embora as medições diretas da irradiação solar remontam do início do Século XX (FRÖHLICH, 1991), as primeiras medidas de concentrações atmosféricas de CO_2 foram realizadas apenas por volta da metade do século passado, enquanto outros gases, como o metano, ocorreram por volta de 1970 (ZELLWEGGER et al., 2016). Nesse contexto, algumas metodologias para avaliação dos fluxos de GEE foram desenvolvidas. Em particular, o presente trabalho usará o método da câmara de solo e a covariância dos vórtices, que serão apresentadas a seguir.

2.4.1 Covariância dos vórtices turbulentos: Técnica Eddy Covariance (EC)

O método da covariância dos vórtices (do inglês “*Eddy Covariance*” – EC) é um dos métodos mais diretos e confiáveis para realizar estimativas de fluxos turbulentos na CLA (BURBA; ANDERSON, 2007). Entretanto, o método é matematicamente complexo e exige que uma série de critérios sejam obedecidos para a sua aplicação de forma confiável.

Matematicamente, a EC estima a covariância entre uma dada concentração de uma grandeza escalar, por exemplo, e a velocidade vertical do vento. A Fig. 2 mostra a representação de dois vórtices que ocorrem em um único ponto do espaço, em instantes distintos (BURBA; ANDERSON, 2007). No instante de tempo I, a parcela de ar C_1 é transportada para baixo com velocidade w_1 , enquanto que, no instante de tempo II, a parcela de ar C_2 é transportada para cima com velocidade w_2 . Ambas as parcelas contém escalares, como umidade, temperatura ou aerossóis, em suas próprias concentrações. Assim, dá-se o fluxo de cada uma das quantidades transportadas por cada uma das parcelas e por quão rápido ocorreu esse transporte (BURBA; ANDERSON, 2007).

Figura 2 – Representação do transporte vertical de duas parcelas de ar C_1 e C_2 em um único ponto, provocado por dois turbilhões com velocidade w_1 e w_2 , respectivamente, em dois instantes de tempo distintos.



Fonte: Adaptado de Burba e Anderson (2007).

Dessa forma, a EC tem a capacidade de medir diretamente o fluxo turbulento, de uma quantidade, produzido pelos vórtices na camada limite atmosférica (STULL, 1988).

O fluxo turbulento, F_χ , para qualquer escalar χ é dado por:

$$F_\chi = \rho_a w \chi, \quad (6)$$

onde, w é a componente vertical do vento e χ é a razão de mistura do escalar e ρ_a é a densidade do ar. As componentes de uma variável do escoamento atmosférico podem ser representadas através da soma de sua parte média e sua flutuação, ou parte turbulenta, pela decomposição de Reynolds, ou médias de Reynolds:

$$\chi = \bar{\chi} + \chi' \quad (7)$$

Aplicando a média de Reynolds à Eq. (6):

$$F_\chi = \overline{(\bar{\rho}_a + \rho'_a)(\bar{w} + w')(\bar{\chi} + \chi')}, \quad (8)$$

após a realização do produto entre os termos da média da Eq. (8), chega-se a:

$$F_\chi = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{\chi} + \bar{\rho}_a \bar{w} \chi' + \bar{\rho}_a w' \bar{\chi} + \bar{\rho}_a w' \chi' + \rho'_a \bar{w} \bar{\chi} + \rho'_a \bar{w} \chi' + \rho'_a w' \bar{\chi} + \rho'_a w' \chi')}. \quad (9)$$

Pela regra da média de Reynolds, a média das flutuações em torno da média são nulas (STULL, 1988). Além disso, o escoamento médio vertical é nulo ($\bar{w} = 0$) e, em terreno plano e próximo à superfície, as flutuações na massa específica do ar são desconsideradas. Portanto, a Eq. 9 pode ser reescrita como:

$$F_\chi \approx \bar{\rho}_a \overline{w' \chi'}. \quad (10)$$

A Eq. (10) pode ser considerada como o fluxo turbulento da quantidade escalar χ (STULL, 1988; BURBA; ANDERSON, 2007).

2.5 Preenchimento de falhas

Após coletados os dados em alta frequência (mínimo 10Hz), eles são passados por um filtro de controle de qualidade, que leva em consideração vários parâmetros, caso algum dado não se encaixe, é descartado. Além desses descartes ocasionarem falhas nos fluxos, outros problemas ocasionam lacunas neles, como: falta de energia nos instrumentos; remoção devido a critérios do controle de qualidade; ocorrência de precipitação. Assim, após os descartes, ficam várias lacunas nos dados de fluxo.

Para obtermos cálculos precisos para os valores anuais de fluxo de CO₂, é necessário preenchimento dessas lacunas. Os métodos comumente utilizados para preencher dados ausentes incluem mean diurnal variation (MDV) (FALGE et al., 2001), look-up table (LUT) (FALGE et al., 2001), regressão não linear (NLR) (FALGE et al., 2001; NOORMETS; CHEN; CROW, 2007), marginal distribution sampling (MDS) (REICHSTEIN et al., 2005), modelo de imputação múltipla (HUI et al., 2004) e rede neural artificial (BRASWELL et al., 2005; SCHMIDT; WRZESINSKY; KLEMM, 2008).

No presente trabalho, utilizou-se o pacote ReddyProc (WUTZLER et al., 2018), que disponibiliza algumas dessas metodologias implementadas para o preenchimento das lacunas nos dados. São utilizados, para auxiliarem no preenchimento dos fluxos dados de temperatura, radiação e déficit de pressão de vapor, para auxiliarem no preenchimento dos fluxos. Através de uma combinação de look-up table (LUT), mean diurnal course (MDC)

e marginal distribution sampling (MDS) métodos descritos em (WUTZLER et al., 2018), acusa os dados faltantes nos fluxos e realiza uma procura por valores de fluxos semelhantes, em uma janela de tempo definida (REICHSTEIN et al., 2005; WUTZLER et al., 2018).

2.6 Particionamento do NEE

Após o preenchimento de falhas é realizado o particionamento do fluxo de CO₂. Através do método EC, estima-se, de forma confiável, o fluxo de CO₂ entre a superfície e a atmosfera, que é definido como a troca líquida de carbono do ecossistema, conhecido com NEE (do inglês *net exchange ecosystem*). Uma parte do fluxo total (NEE) corresponde à respiração do ecossistema (Reco), que engloba respiração das plantas, demais seres vivos e demais formas de emissão de CO₂ na área. A outra parte corresponde à produção primária bruta do inglês *Gross Primary Production* (GPP), que é a absorção de CO₂ pelas plantas através da fotossíntese. Assim, o NEE pode ser escrito como:

$$NEE = Reco + GPP \quad (11)$$

Para encontrar a contribuição de cada componente no NEE, metodologias de particionamento do NEE são utilizadas, sendo uma delas o modelo empírico de Arrhenius para estimar a Reco, proposta por Reichstein et al. (2005), que utiliza o modelo de regressão exponencial (LLOYD; TAYLOR, 1994):

$$Reco = r_b e^{E_0 \left(\frac{1}{(T_{ref} - T_0)} - \frac{1}{(T - T_0)} \right)} \quad (12)$$

considerando que a Reco é o NEE noturno, visto que sem radiação solar cessa a fotossíntese e, portanto, o GPP (unidades de $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), o r_b ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) é a respiração na temperatura de referência, T_{ref} (aqui 15 °C); E_0 (°C) é um parâmetro que caracteriza a sensibilidade da respiração à temperatura, T_0 é um parâmetro de escala de temperatura, mantido constante em -46,02 °C (LLOYD; TAYLOR, 1994), e T é a temperatura do ar. Esta relação é usada para estimar a Reco a partir da temperatura do ar tanto para o período noturno quanto para o diurno. Calcula-se o GPP subtraindo o NEE do Reco durante o período diurno. Existem outras metodologias para o particionamento do fluxo de NEE, como o método proposto por Lasslop et al. (2010). No entanto, no presente trabalho, utilizamos o método proposto por Reichstein et al. (2005).

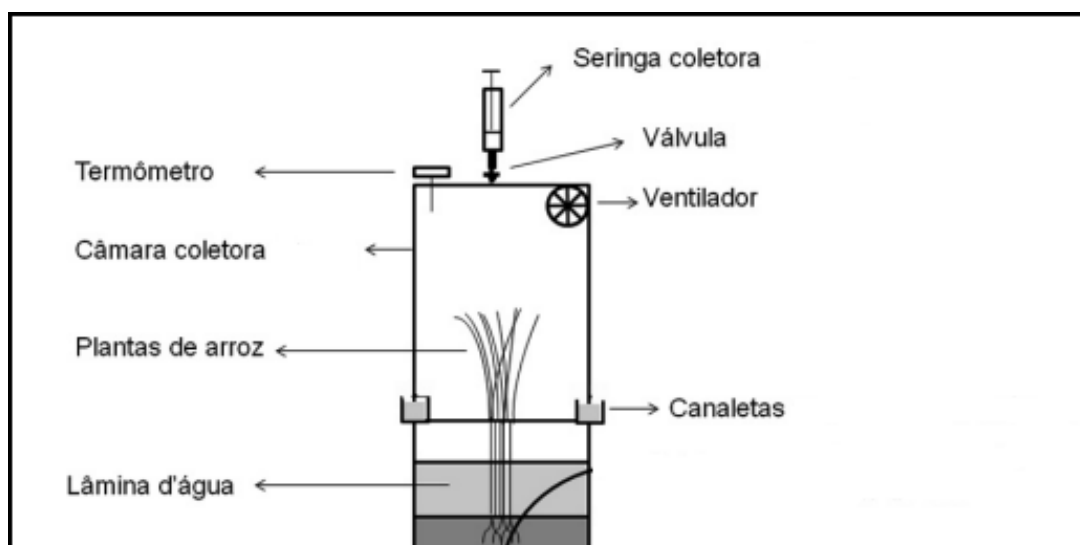
2.6.1 Método da câmara de solo

O método da câmara de solo é o mais utilizado para estimativa do fluxo de GEE de solos agrícolas. Neste método, primeiramente as câmaras são colocadas sobre o solo nu e o cálculo de fluxo é realizado através dos dados de medidas de concentração do gás

no interior dessas câmaras (FERREIRA, 2014). As câmaras de solos podem ser de dois modos: fechadas, que não há renovação do ar, sendo contínuas as mudanças de concentração do gás; abertas, que é mantido um fluxo contínuo de ar através da câmara, sendo que a concentração do gás atinge uma diferença constante em relação à concentração do ar atmosférico (MATTHIAS; BLACKMER; BREMNER, 1980; DENMEAD; RAUPACH, 1993).

O método das câmaras, quando comparados com outros métodos existentes, é o mais vantajoso quando falamos de custo-benefício. Destaca-se pelo fato de ser um método de relativo baixo custo e simples operação. Porém, quando falamos de precisão de leitura, este método apresenta uma desvantagem de provocar alterações na temperatura, pressão e nas concentrações dos gases no interior da câmara, o que pode apresentar alteração no fluxo (MOSIER, 1989). Todas as câmaras utilizadas no experimento devem ser padronizadas e confeccionadas com materiais seguros para minimizar as interações com o ambiente. A área de cobertura da câmara, é algo que também deve ser levado em consideração, pois quanto maior a área de cobertura da câmara mais precisas são as estimativas dos fluxos (COSTA et al., 2006).

Figura 3 – Ilustração do método da câmara de solo fechada.



Fonte: Adaptado de Maboni et al. (2016).

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do local

O presente estudo utilizou dados coletados em um sítio experimental localizado em uma lavoura de arroz no município de Cachoeira do Sul - RS (Fig. 4). Cachoeira do Sul, que é um município brasileiro do estado do Rio Grande do Sul, emancipado de Rio Pardo e instalado em 1820. A origem de seu nome se deve a uma antiga cachoeira existente no Rio Jacuí. O município ganhou notoriedade no mundo do agronegócio brasileiro como Capital Nacional do Arroz, o título foi conquistado no início do século passado e perpetuado pelo vínculo deste município com a cadeia produtiva do arroz. Destaca-se, também, pelo crescimento e melhorias referente à tecnologia para a cultura do arroz, sendo a cidade que promove um dos maiores eventos arroseiros do mundo, a Feira Nacional do Arroz (Fenarroz).

Na lavoura, a inundação para irrigação do arroz ocorreu por desnível entre parcelas, com aproximadamente 100 m X 100 m. A drenagem foi realizada através de canais, que se encontraram em um dos lados da parcela (Fig. 5). Estes canais tem aproximadamente 2 m de largura e 1 m de profundidade. O solo encontrado na região do sítio foi devidamente classificado, como prevê o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, sua classificação foi como Planossolo Hidromórfico (SOLOS, 2013). Para este estudo, foi avaliada duas safras de arroz, 2014/2015 (plantio: 02 de novembro de 2014 e colheita 06 de abril de 2015), com produtividade média de $0,6 \text{ Kg m}^{-2}$, e 2015/2016 (plantio: 14 de novembro de 2015 e colheita 16 de abril de 2016), com produtividade média de $0,4 \text{ Kg m}^{-2}$, onde foi cultivado, em ambas as safras a cultivar 118 comum. Os dados de fluxos de CO_2 na atmosfera, foram analisados entre os meses de maio de 2014 a abril de 2016. O solo permaneceu inundado de 5–10 cm de água parada durante a estação de crescimento até uma semana antes da colheita, a inundação foi mantida com o bombeamento de água do rio próximo. Após a finalização da safra, não são plantadas outras culturas nessa área, permanecendo em pousio com gramíneas selvagens.

Figura 4 – Localização do sítio experimental no mapa.



Fonte: Laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lµmet-UFSM).

Figura 5 – Localização da inundação por parcelas entre canais de drenagem.



Fonte: Laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lumet-UFSM).

3.2 Medidas em torre micrometeorológica

No sítio experimental, foi instalada uma torre micrometeorológica, ou torre de fluxo, no final de 2009 (MABONI et al., 2016). Essa torre precisa seguir alguns parâmetros para instalação, sendo um deles a identificação para qual cultura será utilizada, objetivando definir a altura que será instalada. A Figura 6 apresenta a configuração da torre de fluxo utilizada neste estudo e a Tabela 1 apresenta os sensores de medida de alta frequência para estimativa dos fluxos de CO₂. Além disso, a torres é composta de diversos sensores para medidas atmosféricas e de solo (Figura 6).

Durante o período que ocorreu o experimento, alguns cuidados na manutenção dos sensores foram tomados para não interferir na coleta dos dados e seus resultados. Por ficarem expostos à poeira e às aplicações de fertilizantes e defensivos agrícolas, ocorreu uma limpeza nas lentes dos sensores a cada 15 dias, para não ocorrer nenhuma interferência na qualidade do sinal, conseqüentemente, na qualidade dos dados.

Tabela 1 – Instrumentação e medidas da torre micrometeorológica de Cachoeira do Sul.

Instrumento	Medida	fabricante - modelo	Altura
Anemômetro sônico	u, v, w e θ_v	Campbell Scientific- CSAT-3	3 m
Analisador de gás infravermelho	Concentrações de CO_2 e H_2O	LiCor - 7500	3 m

Figura 6 – Torre micrometeorológica do sítio de Cachoeira do Sul. Visão do anemômetro sônico e dos analisadores de gás para o sistema Eddy Covariance.



Fonte: Laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lumet-UFSM).

3.3 Processamento de dados

3.3.1 Software de processamento de dados e estimativa dos fluxos

O laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lumet-UFSM), realizou a estimativa dos fluxos através da técnica Eddy Covariance, utilizando o software EddyPro®, versão 5.1.1, LiCor (Lincoln, Nebraska, EUA) (MABONI et al., 2021). Neste software, são inseridos os dados de alta frequência que foram coletados através da torre de fluxo e os fluxos foram gerados em médias de 30 minutos. No software são selecionadas as correções e os filtros no momento das estimativas de fluxo: rotação dupla, que visa correções da influência da inclinação do anemômetro sônico, sendo aplicada para determinar os ângulos necessários para colocar o anemômetro sônico em um sistema de coordenadas no sentido do fluxo, envolvendo uma série de duas rotações, aplicadas ao final de cada período de média turbulenta (WILCZAK; ONCLEY; STAGE, 2001); correções para efeitos de densidade; correções devido a filtros de passa baixa. Também, no EddyPro® estão implementadas diversas combinações de correções e ajustes. Para este trabalho, os fluxos foram submetidos às seguintes configurações: cálculo das flutuações turbulentas em média móvel (MONCRIEFF et al., 2004), rotação dupla (WILCZAK; ONCLEY; STAGE, 2001), correção para os efeitos da densidade (WEBB; PEARMAN; LEUNING, 1980), correção espectral de alta frequência (GASH; CULF, 1996), correções filtro passa alta e baixa, seguindo Moncrieff et al. (1997) e Moncrieff et al. (2004), respectivamente.

No software EddyPro® pode ser calculado diferentes sinalizadores com base em testes de estado estacionário e de turbulência bem desenvolvidos (FOKEN et al., 2004): sinalizando valores “0” para fluxos de alta qualidade, “1” para fluxos de qualidade intermediária e “2” para baixa qualidade de fluxos. Para não comprometer a qualidade de leitura dos dados do anemômetro sônico nos dias de chuva, com o acúmulo de água podendo ficar armazenada nos sensores, é necessário o descarte destes dados no período de ocorrência de precipitação e um acréscimo de meia hora para secagem dos instrumentos (RUPPERT et al., 2006).

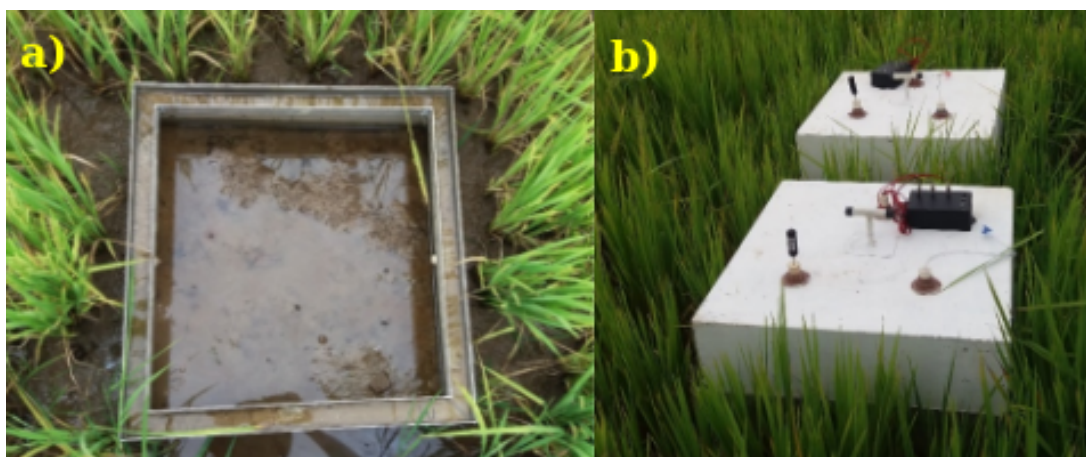
3.3.2 Câmara de solo

Para a medição dos fluxos de CO₂ na superfície, pelo método da câmara de solo, utilizou-se na safra 2014/2015 três câmaras de solo fechadas, estáticas, operadas manualmente, contendo plantas de arroz. Na 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. As câmaras são constituídas de base de alumínio (0,64 m × 0,64 m × 0,20 m) e uma tampa de alumínio do mesmo tamanho. As bases foram inseridas 5 cm no solo. Cada base tinha um fundo aberto e canais seláveis nas laterais, para facilitar o fluxo de água. Os canais nas laterais foram selados durante os

eventos de amostragem de ar.

O fechamento das câmaras e as coletas ocorriam entre das 9h às 12h, períodos de tempos de 0, 5, 10 e 20 minutos para cada câmara. As realizações das coletas foram feitas simultaneamente a cada duas câmaras. Durante cada coleta foi realizada medições de temperatura no interior das câmaras e na água próximo delas. Para encontrar o volume de gás de cada câmara, foram medidas a lâmina d'água no interior das câmaras todos os dias coletados. Para as coletas no campo, utilizou-se seringas com válvulas de três estágios, após, as amostras foram transferidas com o auxílio de uma agulha para ampola de vidro contendo vácuo. Para o transporte das amostras, teve-se o cuidado com as temperaturas e depois despachadas imediatamente para análise laboratoriais de cromatografia gasosa.

Figura 7 – Foto das câmaras de solo instaladas no sítio experimental de Cachoeira do Sul. Na esquerda, câmara sob solo nu (Fig. 7a); na direita, câmara de solo fechada (Fig. 7b).



Fonte: Laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lµmet-UFSM).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os fluxos de CO₂ foram estimados, tanto através de medidas utilizando o método da câmara de solo quanto com medidas atmosféricas, através da técnica da covariância dos vórtices. É importante destacar que enquanto as medidas realizadas pela câmara de solo determinam uma estimativa do fluxo de CO₂ resultante da respiração do ecossistema, ou seja, o somatório da respiração autotrófica e heterotrófica do ambiente, a EC determina o NEE (WUTZLER et al., 2018; MABONI et al., 2021). A soma da Reco com o GPP fornece a produção de troca líquida do ecossistema, conhecido como o NEE.

Assim, será realizada uma análise detalhada do NEE durante o período produtivo da lavoura, buscando caracterizar e quantificar cada uma das componentes da produção primária bruta e da respiração do ecossistema, bem como compreender a relação do papel da cultura quando analisado os dados obtidos pela câmara de solo e pela torre de fluxo, para a respiração do ecossistema.

4.1 Condições ambientais

A Figura 8 representa a média diária das variáveis meteorológicas no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016. Sendo analisadas a Temperatura do ar (T), deficit de pressão de vapor (VPD) e radiação global (R_g). O comportamento da temperatura média diária foi dentro do esperado para uma região de clima subtropical do hemisfério Sul, que se caracteriza pela alta amplitude térmica anual, com verões quentes e invernos frios. O período entre os meses de outubro a março foi o onde as temperaturas mais elevadas foram registradas. Por outro lado, entre abril e setembro foram registradas temperaturas mais amenas, ocorrendo algumas situações de “veranicos” neste intervalo (Fig. 8, painel superior).

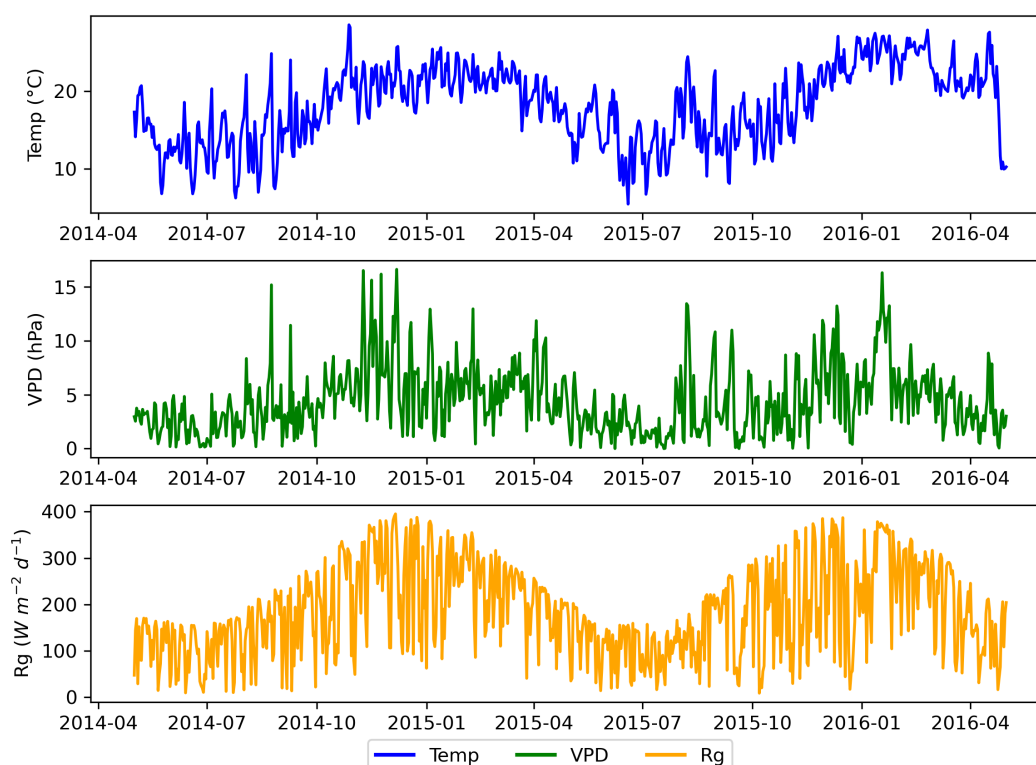
No período de fase reprodutiva da cultura, ela fica extremamente sensível a estresses ambientais, como baixas temperaturas, deficiência de água, entre outros. Em todas as fases fenológicas de desenvolvimento da cultura do arroz, a temperatura apresenta-se como fator limitante. Segundo (GUIMARÃES; FAGERIA; FILHO, 2002), temperatura ideal para seu desenvolvimento na fase da germinação 20 a 35 °C, floração 30 a 33°C e maturação de 20 a 25°C (Fig. 8, painel superior). Nesse contexto, os valores mínimos de temperatura registrados foram 5,4 °C, em 19/06/2015, e 6,2 °C, em 25 de julho de 2014, ambos no período referente ao pousio. Enquanto que os valores máximos foram 28,5 °C, em 28 de outubro de 2014, e 27,9 °C, no dia 25 de fevereiro de 2016, próximo ao plantio da primeira safra e na fase de maturação da segunda safra, respectivamente (Fig. 8, painel superior).

Os valores das variações da média diária de VPD máximo de 16,52 hPa e 16,32 hPa para os dias 09 de novembro de 2014 e 18 de janeiro 2016, respectivamente (Fig. 8, painel do meio). As variações da média diária do VPD acompanharam a amplitude das

variações da temperatura do ar. Os maiores valores de déficit de pressão de vapor (VPD) ocorreram no período de cultivo do arroz e, principalmente, devido às altas temperaturas do ar.

A exigência de radiação solar pela cultura do arroz varia de uma fase fenológica para a outra, as fases reprodutiva e de maturação são as mais importantes (GUIMARÃES; FAGERIA; FILHO, 2002). Há relação linear positiva entre a radiação solar nessas fases e a produtividade de grãos de arroz irrigado. Em termos práticos, esse período ocorre entre três semanas antes e após o início da floração. Neste contexto, a radiação global (R_g) apresenta maiores incidências nos meses de novembro a fevereiro e menores de maio a agosto (Fig. 8, painel inferior). É possível observar que o comportamento da radiação global foi similar em ambos os anos, entretanto, no final do mês de dezembro de 2015 e janeiro de 2016, nota-se uma redução de R_g que pode estar associada a uma alta precipitação nesse período, ocasionando a presença de cobertura de nuvens.

Figura 8 – Média diária das variáveis meteorológicas no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016: Temperatura do ar (painel superior), déficit de pressão de vapor (painel do meio) e radiação global (painel inferior).

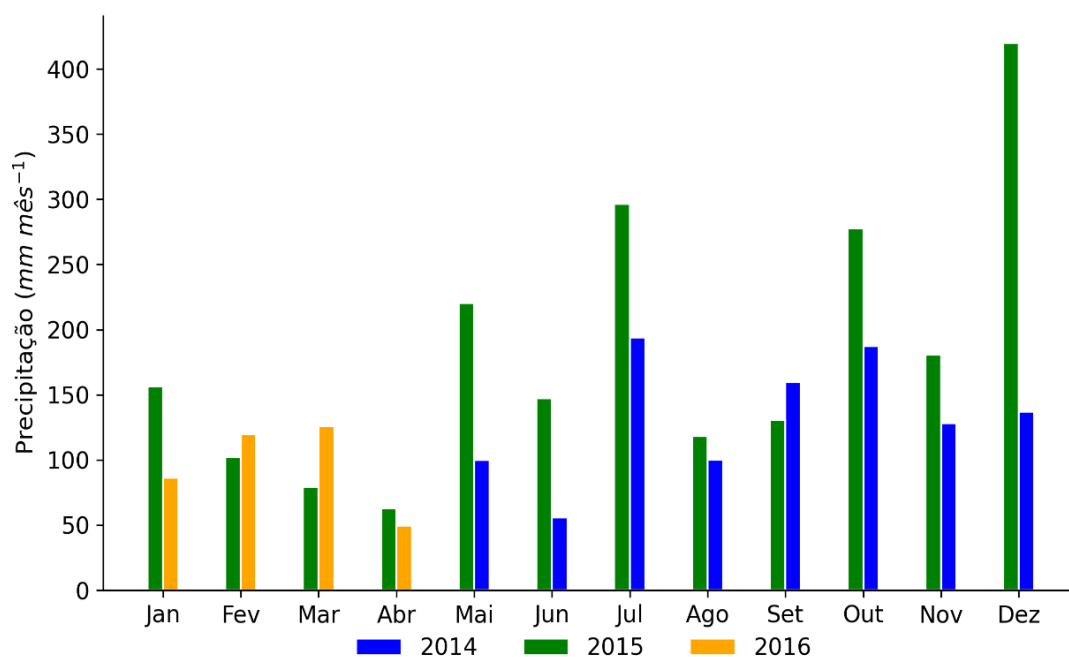


Fonte: A autora.

A Figura 9 mostra as médias mensais de precipitação para o período de análise. Conforme discutido anteriormente, o grande volume de precipitação no mês de dezembro

de 2015 pode estar associado à redução na radiação global, conforme mostrado na Fig. 9. Além disso, observa-se a precipitação bem distribuída ao longo de todo o período analisado e com grande volume de chuva durante o ano de 2015, o qual foi um ano caracterizado pela presença do *El niño* (VAROTSOS; TZANIS; SARLIS, 2016). A alta precipitação pluviométrica na cultura do arroz, de acordo com a quantidade e distribuição, pode fazer com que a plântulas entrem em contato com o herbicida, afetando o desenvolvimento radicular, com isto, aparecerão sintomas de amarelamento das plantas e raízes curtas e grossas (COBUCCI; RABELO; SILVA, 2001). Quando observado a precipitação, podemos analisar precipitações ideais na maior parte do período de produtividade da cultura. Dessa forma, o período de análise foi vantajoso para o desenvolvimento do arroz. Cabe destacar que os maiores acumulados diários de precipitação do período foram os dias 27 de maio, 13 de julho e 22 e 23 de dezembro do ano de 2015, chegando ao acumulado de 119,2 mm, 117,8 mm, 95,6 mm e 111,2 mm, respectivamente (figura não mostrada).

Figura 9 – Média mensal da precipitação no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 e 30 de abril de 2016.



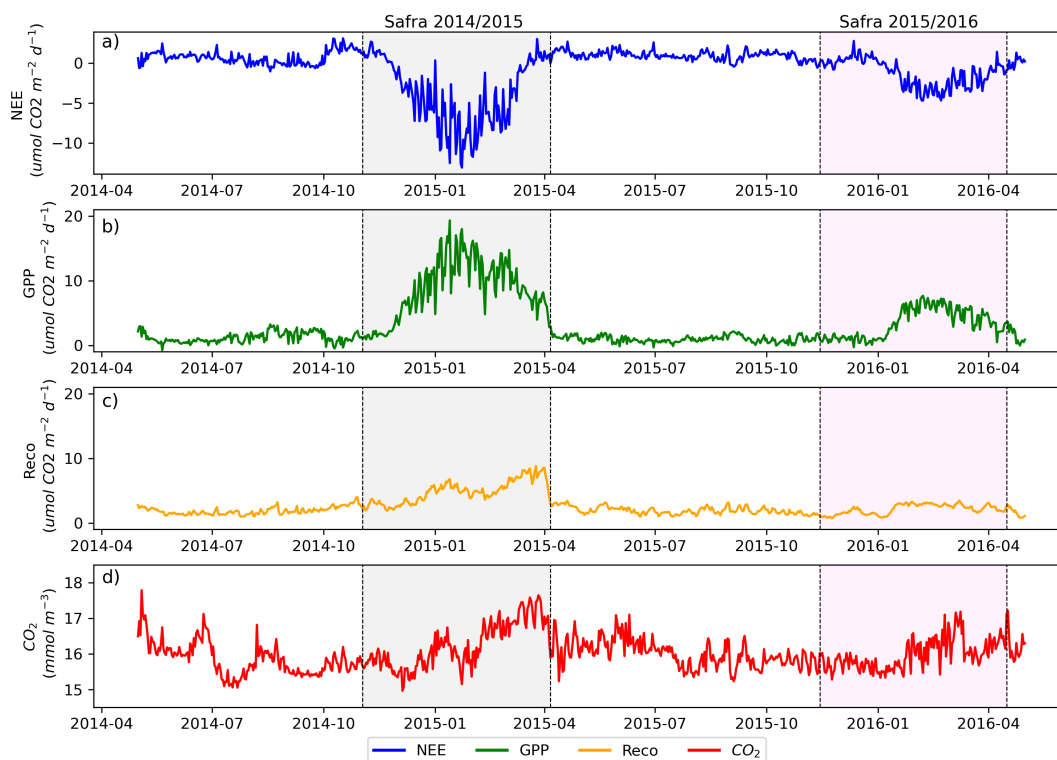
Fonte: A autora.

4.2 Fluxos atmosféricos

A Figura 10 mostra o NEE, o GPP, Reco e a concentração de CO₂ no sítio experimental de Cachoeira do Sul. A troca líquida de CO₂ foi separado entre respiração das plantas e do solo (Reco) e o que é CO₂ absorvido pelo ecossistema através da fotossíntese

das plantas (GPP). Nota-se que, antes do plantio de ambas as safras, os valores de GPP e Reco são muito baixos, chegando a $0,97 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em 25 de julho de 2014 e $0,95 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em 16 de julho de 2015, enquanto que o NEE é sempre positivo, ou seja, o ecossistema é um emissor de CO_2 neste período. Depois da emergência das plantas e início de seu desenvolvimento, podemos ver que o GPP começa a aumentar, chegando a $19,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no dia 13 de janeiro de 2014 e $7,66 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em 7 de fevereiro de 2016, devido ao aumento da fotossíntese. Durante todo o crescimento das plantas do arroz, vemos que o GPP é maior que a Reco, resultando em valores negativos do NEE, indicando que o ecossistema é um absorvedor de CO_2 nesse período de safra. Próximo ao fim da safra, antes da colheita, a planta finaliza seu estado reprodutivo e começa a senescer, reduzindo drasticamente a fotossíntese e a respiração começa a ser maior que o GPP. Além disso, a redução brusca na respiração do ecossistema (Fig. 10a) pode estar relacionada a uma prática muito comum naquela região, a dessecação para a pré-colheita, logo após a colheita, a área fica parada até o próximo plantio, já que a respiração fica reduzida até esse período. Segundo (AGOSTINETTO; FLECK; MENEZES, 2001) a ação desseccante dos herbicidas apressa a redução da umidade dos grãos de arroz e permite antecipar a colheita de dois a seis dias. Entretanto, a CO_2 não apresenta variações significativas para períodos de cultivo do arroz e nem para períodos de pousio (Fig. 10 d)

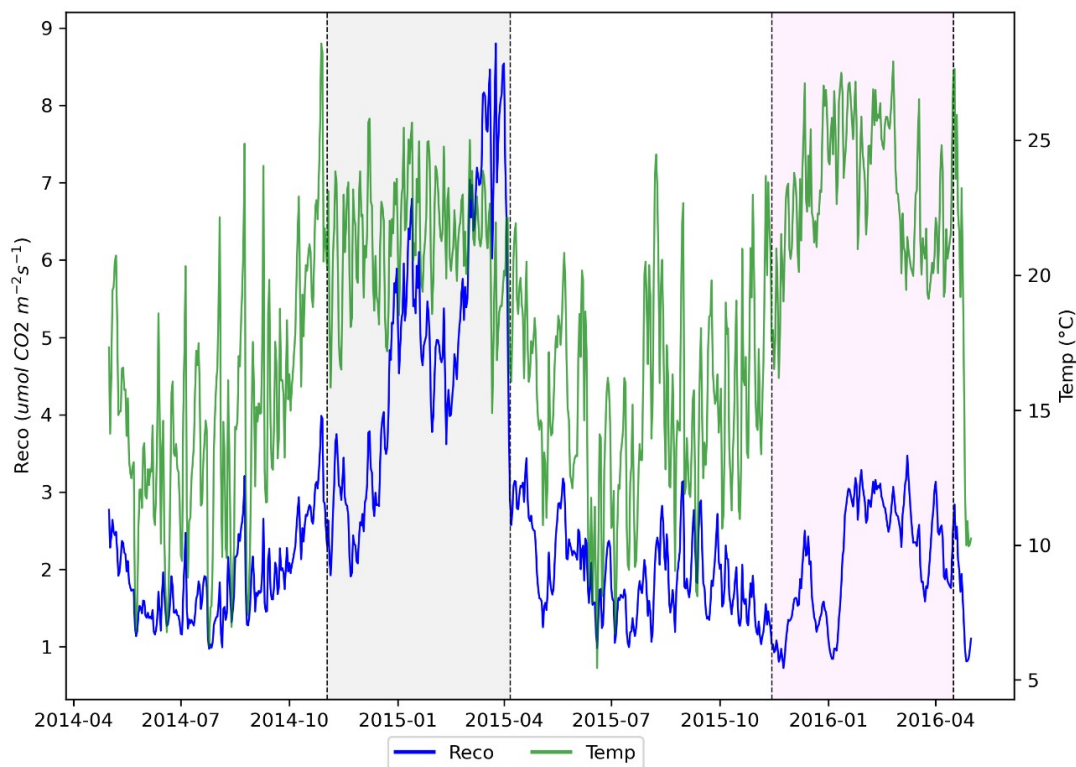
Figura 10 – Fig. 10a Troca Líquida do Ecossistema (NEE), Fig. 10b Produção primária bruta (fotossíntese), do inglês Gross primary production (GPP), Fig. 10c Respiração do Ecossistema (Reco) e Fig. 10d concentração de CO_2 no sítio experimental de Cachoeira do Sul.



Fonte: A autora.

A Figura 11 mostra que a respiração tem sensibilidade com a temperatura, todavia, a sensibilidade foi analisada de forma visual, sendo mais presente no período de crescimento da planta. É importante destacar que no período da safra, no qual as temperaturas do ar são mais elevadas, existe um maior valor de respiração, quando comparado ao período de pousio, ocorre porque, no período em que a planta está sendo cultivada, existe a respiração da planta e do solo e seus microrganismos, entretanto, no período de pousio diminui a respiração, pois não há mais a respiração da planta em desenvolvimento.

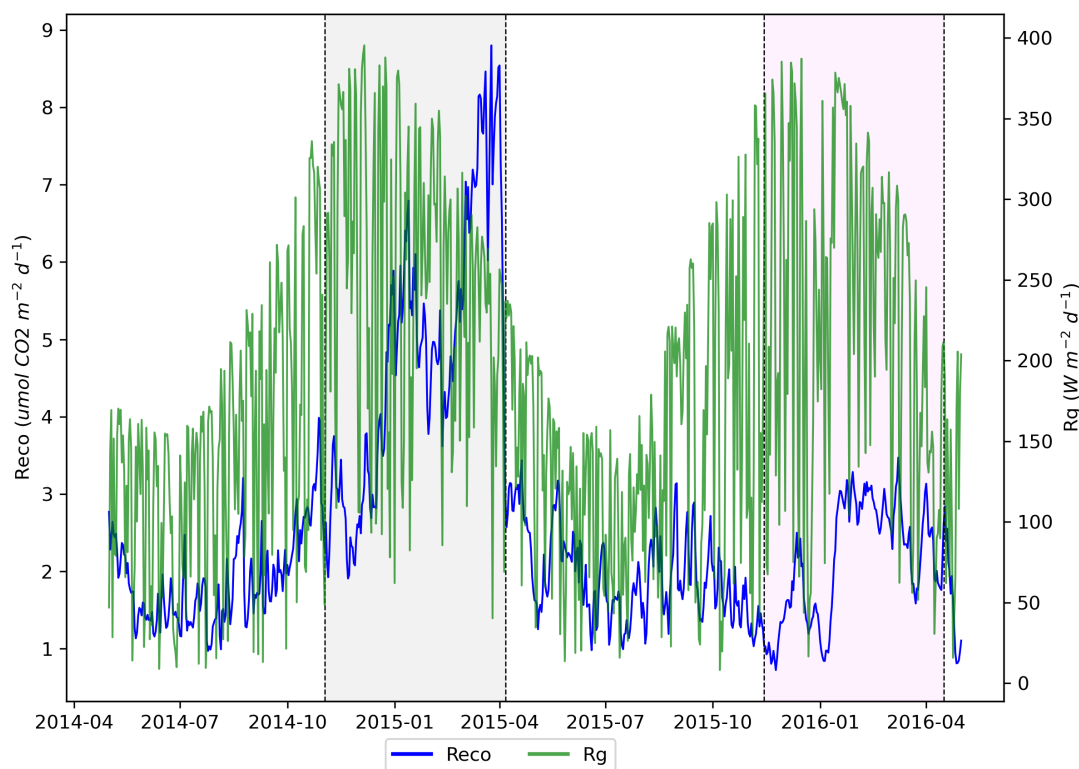
Figura 11 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas demarcadas representam as safras de arroz.



Fonte: A autora.

Quando Reco é comparada com a radiação global (Fig. 12), nota-se que quando ocorre um aumento de radiação global também há um aumento na Reco, podendo existir acessões como no final da safra de 2014/2015, que pode ter sido ocasionadas pela prática de dessecação exercida antes da colheita. Apesar de no final da referida safra R_g já estar diminuindo, devido, também, ao ciclo anual do sol, o ecossistema absorveu o CO_2 , o que pode estar associado à elevada temperatura do solo no período (figura não mostrada). No trabalho (COSTA, 2005), demonstra resultados onde a temperatura do solo resulta em maior produção do fluxo de CO_2 , não havendo impedimento à sua difusão para a atmosfera.

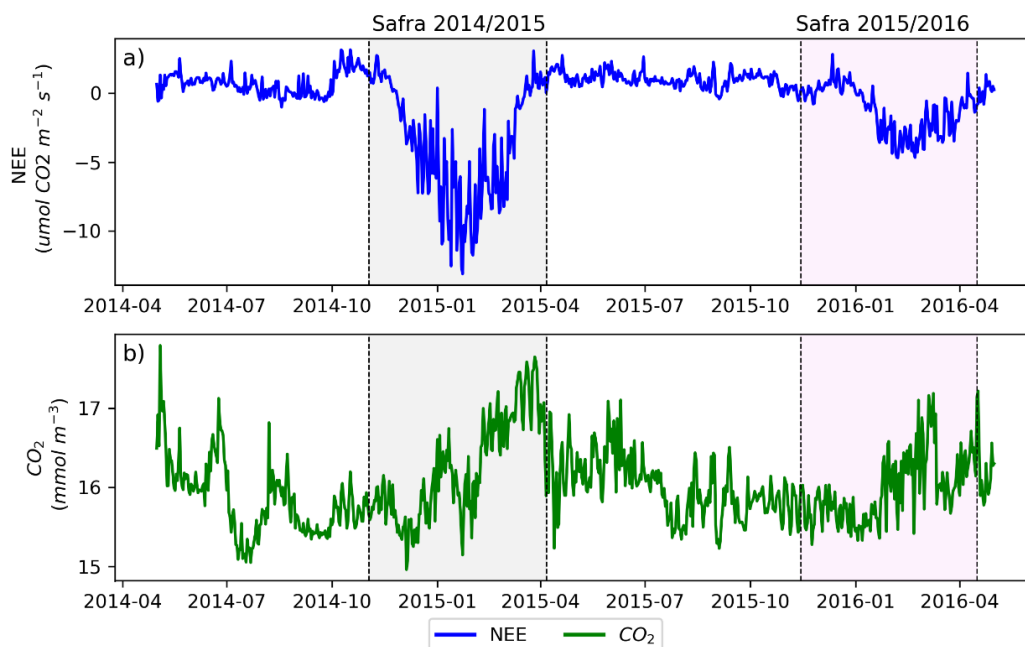
Figura 12 – Respiração do Ecossistema (Reco) e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016. As áreas hachuradas representam as safras de arroz.



Fonte: A autora.

Os valores máximos de NEE encontrados, para as safras de 2014/2015 e 2015/2016, foram no dia 26 de março de 2015 com $3,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e no dia 12 de dezembro de 2015 com $2,79 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Fig. 13). Pode-se analisar que na concentração de CO_2 , assim como nos valores de NEE, houveram variações em ambas as safras. O valor mais alto encontrado para concentração de CO_2 foi em 20 de junho de 2014, quando se encontrava em pousio, já no período que estava a cultura do arroz irrigado, os maiores valores foram $18,97 \text{ mmol}^{-3}$ e $15,64 \text{ mmol}^{-3}$ no dia 02 de abril de 2015 e 04 de abril de 2016. Entretanto, cabe ressaltar que esse valor foi registrado bem próximo à colheita.

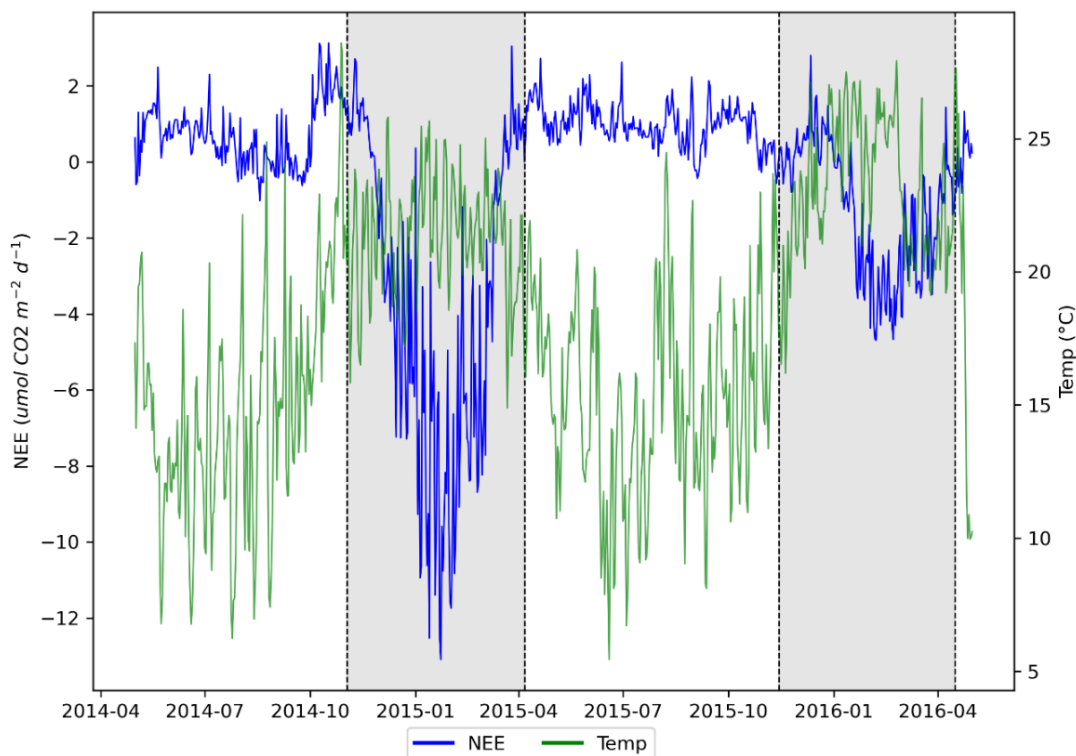
Figura 13 – Média diária do NEE (Fig. 13a) e da concentração de CO_2 (Fig. 13b) no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016.



Fonte: A autora.

A Figura 14 mostra a forma com a qual os valores de NEE respondem às variações de temperatura do ar. A evolução de NEE tem comportamento oposto ao da temperatura do ar, ou seja, quanto maiores os valores de radiação e temperatura mais negativos os valores de NEE são, logo, mais absorvedor será o ecossistema. Os valores de NEE mais altos, quando o ecossistema caracteriza-se como um absorvedor de CO_2 nas safras foram $-13,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, no dia 23 de janeiro de 2015, com uma temperatura de $20,7^\circ\text{C}$ e $-4,69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, no dia 7 de fevereiro de 2016, sendo a respectiva temperatura $25,5^\circ\text{C}$.

Figura 14 – NEE e Temperatura do Ar no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016.

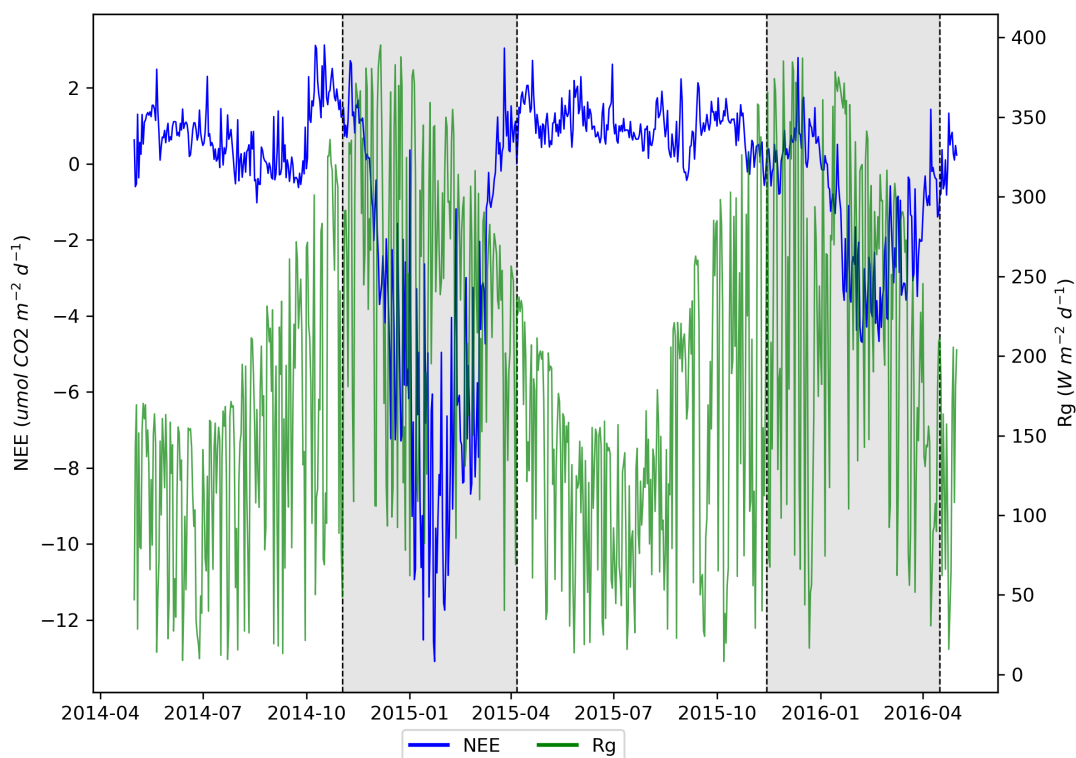


Fonte: A autora.

A análise de NEE e da radiação global (Fig. 15) mostra que o pico máximo ($395,30 \text{ W m}^{-2}$) e o mínimo ($8,90 \text{ W m}^{-2}$) de radiação global foram observados nos dias 05 de dezembro de 2014 e 13 de junho de 2014, respectivamente. Já para os períodos de safras, quando os valores encontrados demonstram que o ecossistema está sendo um absorvedor de CO_2 , com os valores de $-13,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e $-4,69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, os respectivos valores de radiação global são $344,64 \text{ W m}^{-2}$ e $320,25 \text{ W m}^{-2}$.

As medições de dados R_g mostram que os eventos de radiação máxima nesta região diminuem gradualmente à medida que o inverno se aproxima. Já o NEE é notável que durante o período de pousio, quando a maioria dos seus valores estão acima de zero, o ecossistema é um emissor de CO_2 .

Figura 15 – NEE e Radiação Global no sítio experimental de Cachoeira do Sul no período de 01 de maio de 2014 a 30 de abril de 2016.

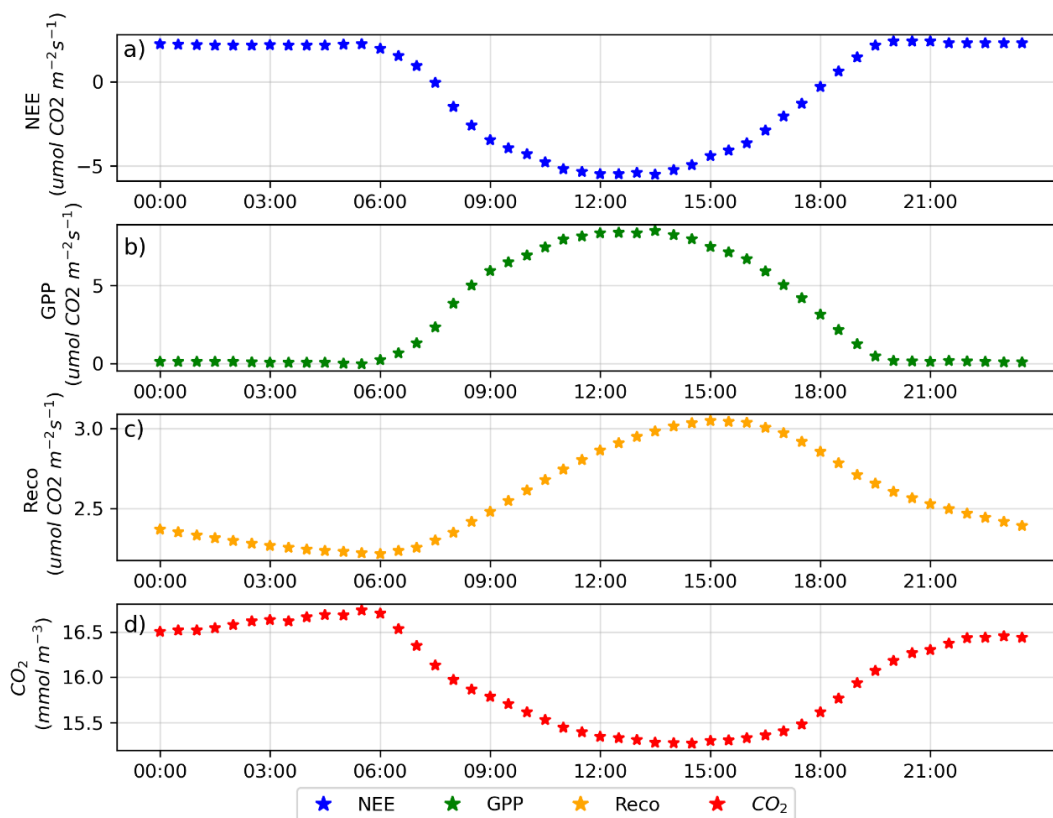


Fonte: A autora.

4.3 Ciclo diurno

A Figura 16 mostra a troca líquida do ecossistema de CO_2 (NEE) (Fig. 16a), a produção primária bruta (GPP) (Fig. 16b), a Respiração do Ecossistema (Reco) (Fig. 16c) e a concentração de CO_2 (Fig. 16d) durante um ciclo médio diurno. Os valores de NEE no período noturno, sem a realização de fotossíntese, são positivos. Durante o dia é notável valores negativos, como podemos observar para às 12:00 horas encontra-se um valor, $-5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ou seja, ocorrendo a absorção de CO_2 . Durante o desenvolvimento, as plantas também liberam CO_2 no período noturno, assim, quando as plantas respiram, não há luz para fazer a fotossíntese. (CARNEIRO et al., 2007) obteve resultado parecido, no qual normalmente o comportamento do fluxo de CO_2 no período noturno é positivo, quando a planta emite CO_2 para a atmosfera. Logo após o nascer do sol, o fluxo de CO_2 começa a diminuir, demonstrando que a planta está sendo um absorvedor de CO_2 . A concentração de CO_2 sofre redução no período do dia e aumento na parte da noite, com valor máximo de $18,23 \text{ mmol m}^{-3}$ às 06 horas e valor mínimo de $15,84 \text{ mmol m}^{-3}$ às 15 horas, sendo seu comportamento inversamente proporcional à Reco.

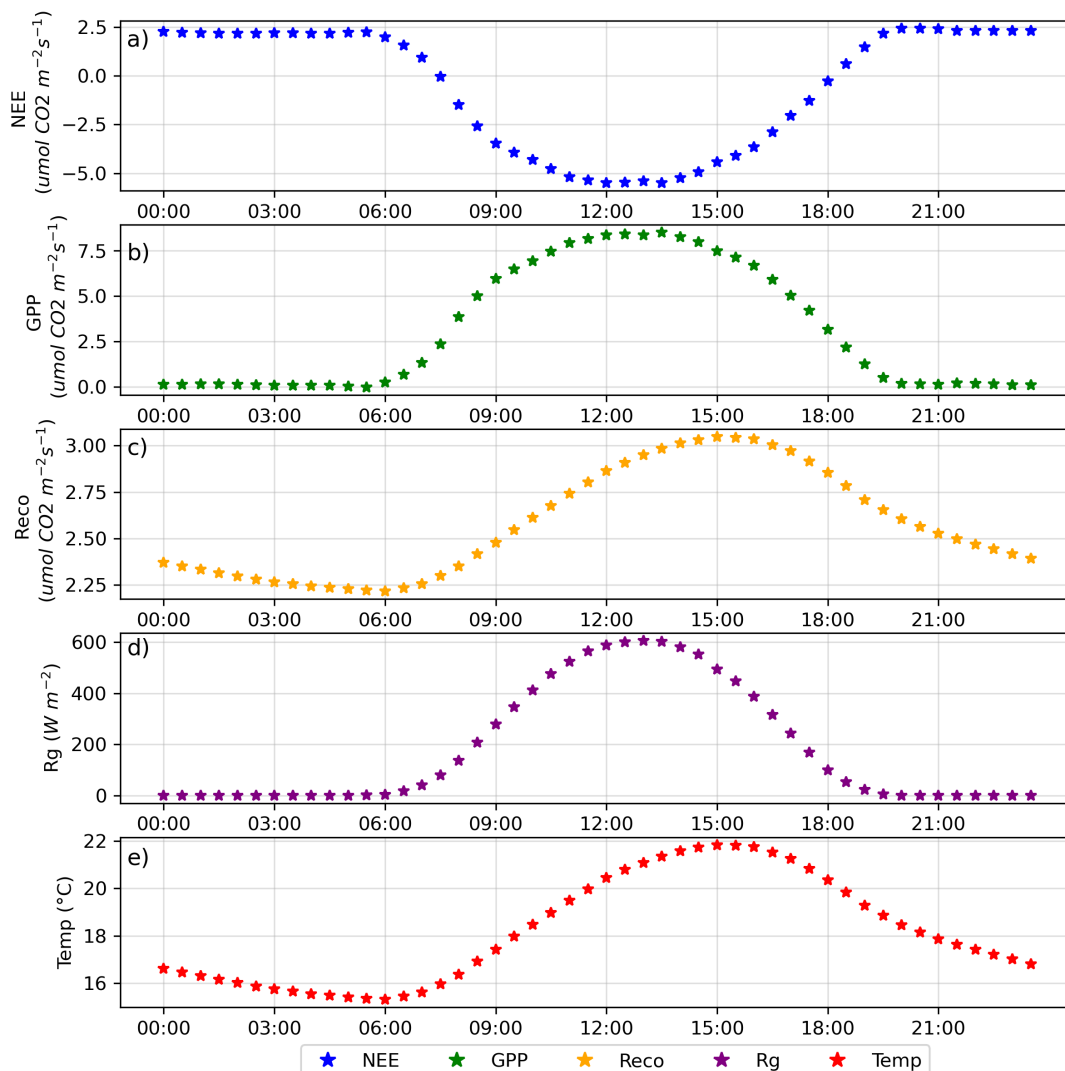
Figura 16 – Comportamento médio durante o ciclo diurno da Troca líquida do ecossistema de CO_2 (NEE) (Fig. 16a), da produção primária bruta (fotossíntese) (Fig. 16b), da Respiração do Ecossistema (Reco) (Fig. 16c) e da concentração de CO_2 (Fig. 16d).



Fonte: A autora.

A Figura 17 apresenta o comportamento do ciclo diurno médio do NEE (Fig. 17a), respiração do ecossistema (Fig. 17b) e temperatura do ar (Fig. 17c), durante o mesmo. Percebe-se que Reco e temperatura possuem comportamento similares, isso acontece devido aos valores de respiração, que são mais elevados no período do dia, em que as temperaturas estão mais elevadas, no período que a fotossíntese ocorre, aumentando a respiração da planta e do solo, consequentemente a produtividade dos microrganismos devido ao calor, liberando, assim, CO_2 na atmosfera. Portanto, a respiração é decorrente da fotossíntese, a qual é decorrente da radiação global, esta quem comanda a temperatura. Sendo elas, a radiação global e a temperatura, as duas variáveis responsáveis por comandar o GPP, NEE e a Reco.

Figura 17 – Comportamento médio para um ciclo diurno no período entre 01 de maio de 2014 e 30 de abril de 2016 das variáveis: NEE (Fig. 17a), respiração do ecossistema (Fig. 17b) e temperatura do ar (Fig. 17c) no sítio experimental de Cachoeira do Sul.



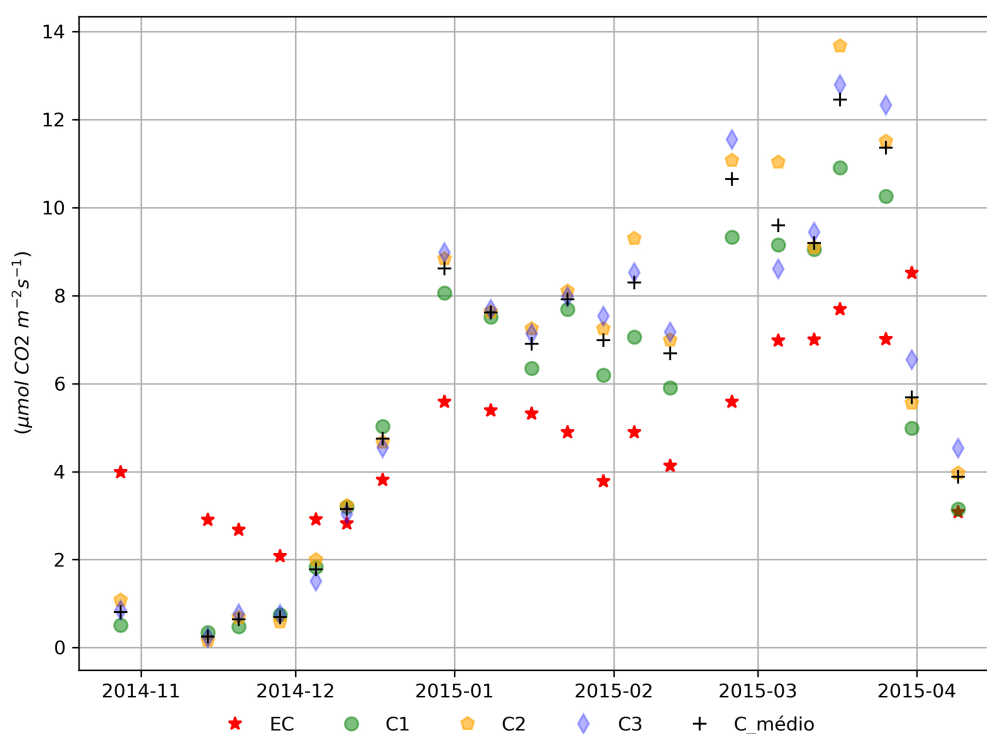
Fonte: A autora.

4.4 Comparações das emissões de CO_2 através do método da câmara de solo e método Eddy Covariance

As Figuras 18 e 19 apresentam a comparação entre as medidas das emissões do ecossistema feitas pelo método da câmara e através da utilização da torre micrometeorológica. São mostrados os valores médios diários da respiração do ecossistema, obtidos através das técnicas da câmara de solo e Eddy Covariance para os dias das coletas na câmara. Pode-se observar que, entre os meses de fevereiro e março, os valores de respiração do ecossistema atingiram valores altos, chegando entre $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $13 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Quando analisados os valores da câmara de solo com os valores

de respiração do ecossistema obtidos pelo EC, podemos averiguar que os resultados da câmara de solo se sobressaíram quando comparados aos do EC.

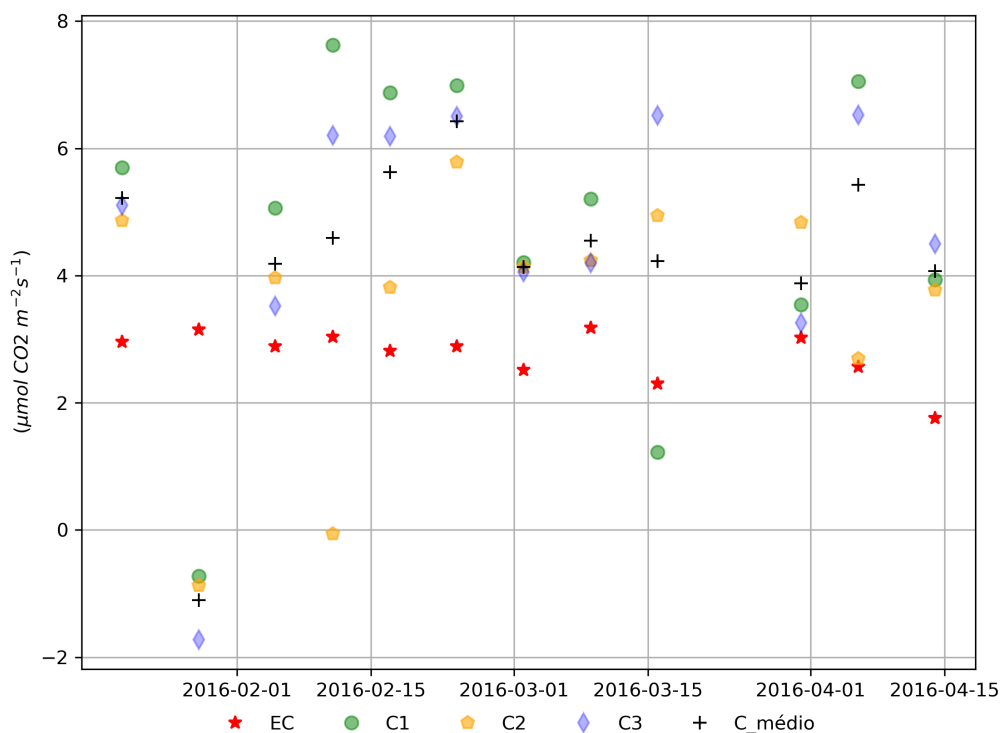
Figura 18 – Média diária da respiração do solo na safra 2014-2015, obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C_{solo} representa o valor na câmara sobre solo nu; C_{medio} representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC.



Fonte: A autora.

Para a segunda safra, os dados da câmara de solo, quando comparados com os de respiração do ecossistema obtidos pelo EC, foram mais dispersos (Fig. 19) que a primeira. Podemos observar que a maioria dos valores obtidos pela câmara do solo são valores elevados, existindo uma exceção, onde verificamos um valor negativo de respiração do ecossistema e do solo, no início das coletas. Esse valor pode ter sido gerado por falhas, pois o EC resultou no valor de $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. No entanto, podemos observar que tanto na primeira safra quanto na segunda, quando comparamos os dados de respiração coletados através do método Eddy Covariance com os dados pelo método da câmara de solo, há uma diferença significativa, destacando-se os dados obtidos pelo método da câmara de solo.

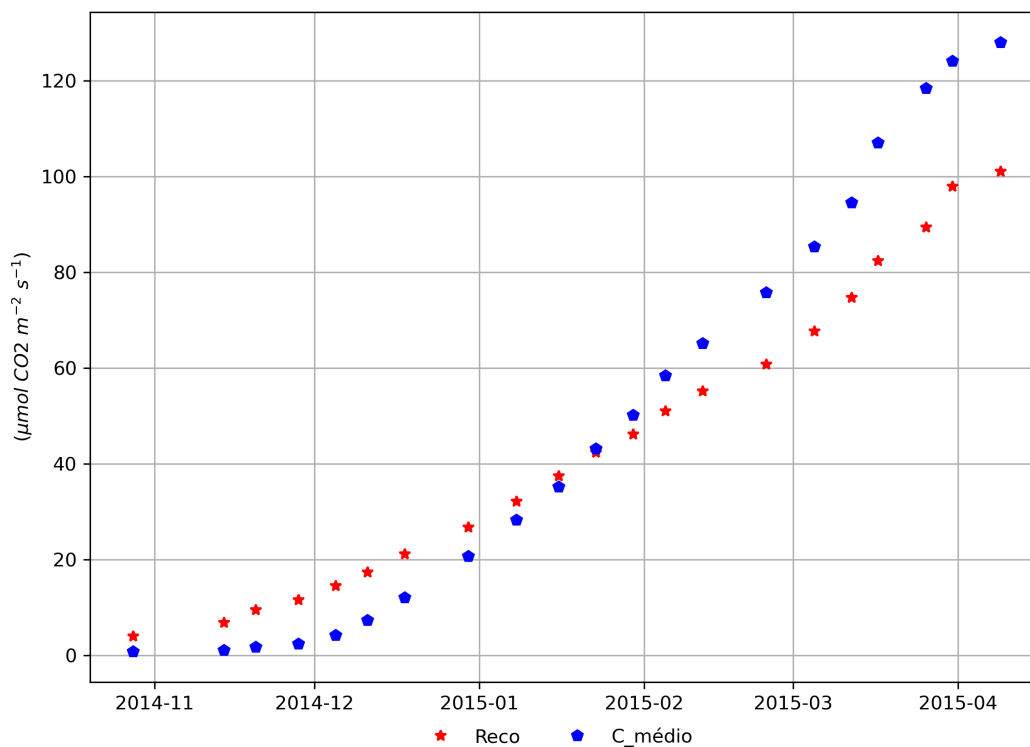
Figura 19 – Média diária da respiração do solo na safra 2015- 2016, obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul. C1, C2, C3 representam as medidas em 3 diferentes câmaras; C_{solo} representa o valor na câmara sobre solo nu; C_{medio} representa o valor médio das câmaras; EC representa os fluxos atmosféricos obtido pelo método EC.



Fonte: A autora.

As figuras 20 e 21 apresentam os valores da média diária acumulada de CO_2 que foram obtidos pelo método da câmara do solo e pelo método do Eddy Covariance, no sítio experimental de Cachoeira do Sul. Na figura 20, que representa a safra 2014- 2015, podemos observar que, em todo período de análise, os métodos tiveram comportamento semelhante, onde a partir de fevereiro de 2015 os dados da câmara de solo se sobressaem aos dados do Eddy Covariance. O valor acumulado encontrado no método de de câmara de solo foi de $127.93 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e o valor para o método Eddy Covariance foi de $101.00 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ambos os valores para a safra de 2014- 2015.

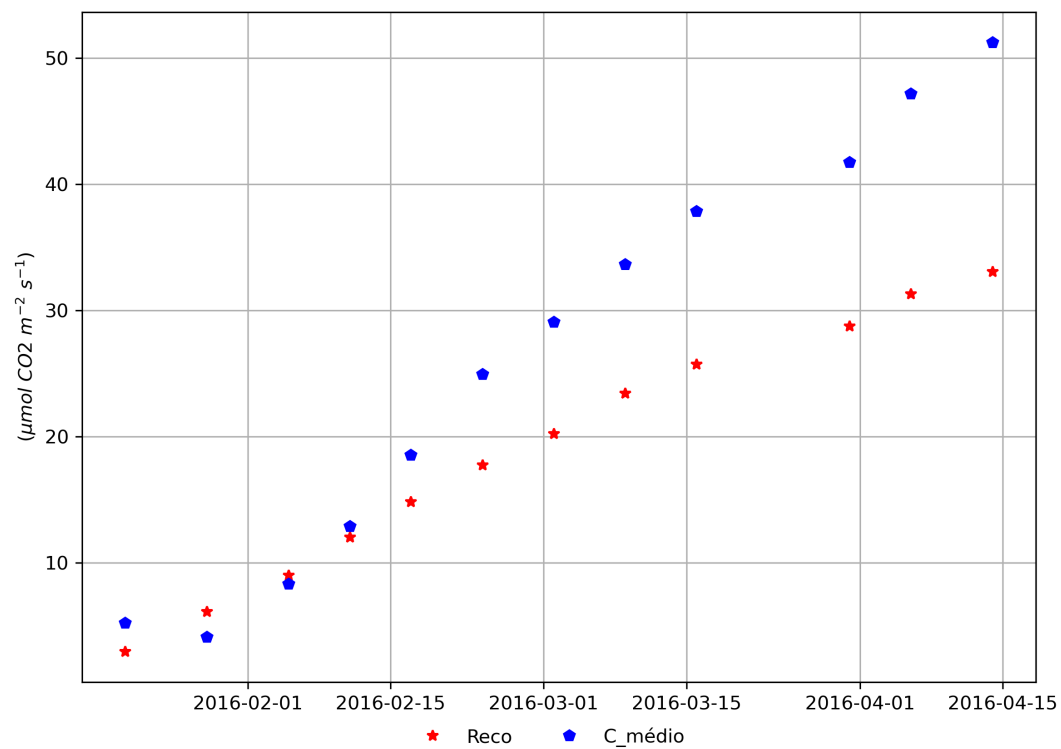
Figura 20 – Média diária acumulada de CO₂, obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul nas safras 2014- 2015



Fonte: A autora.

A figura 21 representa os valores da média diária acumulada de CO₂ para a safra de 2015-2016, podemos observar que os dados analisados, para ambos os métodos, começaram no mês de fevereiro de 2016, devido não ter tido leituras das câmaras de solo anteriormente. Para essa safra, também, notamos que o método da câmara de solo superestimou o Eddy Covariance, sendo o valor acumulado de 51.21 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹, quando o valor acumulado do Eddy Covariance foi de 33.06 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹. Desta forma, observamos que, em ambas as safras analisadas, os valores maiores da média diária acumulada foram encontrados pelo método da câmara de solo.

Figura 21 – Média diária acumulada de CO₂, obtida pelas câmaras e torre no sítio experimental de Cachoeira do Sul nas safras 2015- 2016



Fonte: A autora.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo comparou as estimativas de fluxo CO_2 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. Utilizou-se dados coletados em duas safras, 2014-2015 (plantio: 02 de novembro de 2014 e colheita 6 de abril de 2015) e 2015-2016 (plantio: 14 de novembro de 2015 e colheita 16 de abril de 2016), sobre uma lavoura de arroz irrigado por inundação no município de Cachoeira do Sul.

Para complementar estudos existentes (MABONI et al., 2016, 2021), foram analisados dados do particionamento do NEE, obtidos pelo Eddy Covariance, que correspondem à respiração do ecossistema (Reco) e a absorção de CO_2 pelas plantas através da fotossíntese (GPP), comparando com os dados de respiração do ecossistema coletados através da câmara de solo. Quando comparadas a GPP e a Reco, foi possível observar que a GPP e o Reco foram maiores durante o período produtivo da lavoura. A Reco foi maior durante o verão do que no inverno, porque as temperaturas são mais altas no verão, o que aumenta a atividade dos microrganismos do solo, que respiram e liberam CO_2 na atmosfera.

Os resultados deste estudo indicam que o método da câmara de solo e a técnica de covariância de vórtices são ferramentas eficazes para medir o fluxo de CO_2 em lavouras, embora a câmara de solo superestime as emissões do ecossistema em relação as medidas da torre de fluxo entre 30 e 60 %. No entanto, é importante notar que esses métodos são limitados pela escala do estudo. Para uma avaliação mais precisa do fluxo de CO_2 , estudos mais detalhados em áreas maiores são necessários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; MENEZES, V. G. Herbicidas não seletivos aplicados na fase de maturação do arroz irrigado. **Scientia Agricola**, SciELO Brasil, v. 58, p. 277–285, 2001.

ARYA, P. S. **Introduction to micrometeorology**. [S.l.]: Elsevier, 2001.

BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em ciência do solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Viçosa, Brazil, v. 7, p. 55–118, 2011.

BRASWELL, B. H. et al. Estimating diurnal to annual ecosystem parameters by synthesis of a carbon flux model with eddy covariance net ecosystem exchange observations. **Global Change Biology**, Wiley Online Library, v. 11, n. 2, p. 335–355, 2005.

BURBA, G. G.; ANDERSON, D. J. Guidelines for eddy covariance method. In: **28th Conference on Agricultural and Forest Meteorology**. [S.l.: s.n.], 2007.

CARNEIRO, J. V. et al. Fluxos turbulentos de co₂ em uma área de arroz irrigado no rs. Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

COBUCCI, T.; RABELO, R. R.; SILVA, W. d. Manejo de plantas daninhas na cultura do arroz de terras altas na região dos cerrados. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001., 2001.

COSTA, F. d. S. Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropical brasileiro. 2005.

COSTA, F. d. S. et al. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 36, p. 693–700, 2006.

CULF, A. D.; FOKEN, T.; GASH, J. H. The energy balance closure problem. In: **Vegetation, Water, Humans and the Climate: A New Perspective on an Interactive System**. [S.l.]: Springer, 2004. p. 159–166.

DENMEAD, O.; RAUPACH, M. Methods for measuring atmospheric gas transport in agricultural and forest systems. **Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change**, Wiley Online Library, v. 55, p. 19–43, 1993.

DIAZ, M. B. et al. **Análise das componentes dos fluxos superficiais de massa e energia na região Sul do Brasil**. 2018. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

DUIKER, S.; LAL, R. Carbon budget study using co₂ flux measurements from a no till system in central ohio. **Soil and Tillage Research**, Elsevier, v. 54, n. 1-2, p. 21–30, 2000.

EMBRAPA, S. **VI Plano Diretor da Embrapa: 2014-2034**. [S.l.]: EMBRAPA Brasília, 2015.

FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and forest meteorology**, Elsevier, v. 107, n. 1, p. 43–69, 2001.

- FERREIRA, E.; RESCK, D.; GOMES, A. Medidas do fluxo de CO_2 do solo pelos métodos da absorção alcalina e analisador de gás infravermelho em diferentes sistemas de manejo no cerrado. **Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005., 2005.
- FERREIRA, F. M. d. S. Temperatura e umidade do solo e a dinâmica dos fluxos de N_2O e CO_2 em um sistema lavoura-pecuária. 2014.
- FLORIDES, G. A.; CHRISTODOULIDES, P. Global warming and carbon dioxide through sciences. **Environment international**, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 390–401, 2009.
- FOKEN, T. The energy balance closure problem: An overview. **Ecological Applications**, Wiley Online Library, v. 18, n. 6, p. 1351–1367, 2008.
- FOKEN, T.; AUBINET, M.; LEUNING, R. The eddy covariance method. In: **Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 1–19.
- FOKEN, T. et al. Post-field data quality control. In: **Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis**. [S.l.]: Springer, 2004. p. 181–208.
- FRÖHLICH, C. History of solar radiometry and the world radiometric reference. **Metrologia**, IOP Publishing, v. 28, n. 3, p. 111, 1991.
- GASH, J.; CULF, A. Applying a linear detrend to eddy correlation data in realtime. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 79, n. 3, p. 301–306, 1996.
- GUIMARÃES, C. M.; FAGERIA, N. K.; FILHO, M. P. B. Como a planta de arroz se desenvolve. **Informações Agrônomicas, Piracicaba**, v. 13, n. 99, p. 12, 2002.
- HOBBS, P.; MISSELBROOK, T.; CUMBY, T. Production and emission of odours and gases from ageing pig waste. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 72, n. 3, p. 291–298, 1999. ISSN 0021-8634. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021863498903729>>.
- HUI, D. et al. Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (mi) for annual estimations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 121, n. 1-2, p. 93–111, 2004.
- JANSSENS, I. A.; KOWALSKI, A. S.; CEULEMANS, R. Forest floor CO_2 fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 106, n. 1, p. 61–69, 2001.
- 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.
- LEUNING, R. et al. Carbon and water fluxes over a temperate eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in australia: measurements and comparison with modis remote sensing estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 129, n. 3-4, p. 151–173, 2005.

LLOYD, J.; TAYLOR, J. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional ecology**, JSTOR, p. 315–323, 1994.

LUNDEGÅRDH, H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. **Soil science**, LWW, v. 23, n. 6, p. 417–453, 1927.

MABONI, C. et al. The fallow period plays an important role in annual ch₄ emission in a rice paddy in southern brazil. **Sustainability**, MDPI, v. 13, n. 20, p. 11336, 2021.

_____. Fluxo de metano na atmosfera sobre uma cultura de arroz irrigado por inundação no sul do brasil. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

MABONI, C. et al. **Fluxo de metano no bioma Pampa: análises em área de arroz e de pecuária**. 2021. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

MACHADO, P. L. d. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 28, p. 329–334, 2005.

MAHRT, L. Stratified atmospheric boundary layers. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 90, n. 3, p. 375–396, 1999.

MATOS, V. N. et al. Quantificação de emissões de gases de efeito estufa no transporte de resíduos: estudo de caso da ufba. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, p. 53–65, 2017.

MATTHIAS, A.; BLACKMER, A.; BREMNER, J. **A simple chamber technique for field measurement of emissions of nitrous oxide from soils**. [S.l.], 1980.

MONCRIEFF, J. et al. Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series. In: **Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis**. [S.l.]: Springer, 2004. p. 7–31.

_____. Trace gas exchange over terrestrial ecosystems: methods and perspectives in micrometeorology. **Journal of experimental botany**, Oxford University Press, v. 48, n. 5, p. 1133–1142, 1997.

MOSIER, A. Chamber and isotope techniques. **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystem and the atmosphere**, John Wiley & Sons Ltd., p. 175–187, 1989.

MURPHY, R. M. et al. Nitrous oxide emission factors from an intensively grazed temperate grassland: A comparison of cumulative emissions determined by eddy covariance and static chamber methods. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Elsevier, v. 324, p. 107725, 2022.

NOORMETS, A.; CHEN, J.; CROW, T. R. Age-dependent changes in ecosystem carbon fluxes in managed forests in northern wisconsin, usa. **Ecosystems**, Springer, v. 10, p. 187–203, 2007.

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

PAUSTIAN, K. et al. Climate change and greenhouse gas mitigation: challenges and opportunities for agriculture. **CAST Task Force Report**, v. 141, 2004.

POST, W. M. et al. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. In: **Storing carbon in agricultural soils: A multi-purpose environmental strategy**. [S.l.]: Springer, 2001. p. 73–99.

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus B**, Wiley Online Library, v. 44, n. 2, p. 81–99, 1992.

REICHSTEIN, M. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global change biology**, Wiley Online Library, v. 11, n. 9, p. 1424–1439, 2005.

RETH, S.; GÖCKEDE, M.; FALGE, E. Co₂ efflux from agricultural soils in eastern germany—comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 80, n. 2, p. 105–120, 2005.

RUPPERT, J. et al. Innovative gap-filling strategy for annual sums of co₂ net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 138, n. 1-4, p. 5–18, 2006.

SALVADOR, N. **Estudo da Camada Limite Atmosférica em Regiões Metropolitanas Costeiras com simulações de brisa marítima**. 2014. Tese (Doutorado) — PhD Thesis) Universidade Federal do Espírito Santo-UFES, Vitória, 2014.

SCHMIDT, A.; WRZESINSKY, T.; KLEMM, O. Gap filling and quality assessment of co₂ and water vapour fluxes above an urban area with radial basis function neural networks. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 126, p. 389–413, 2008.

SOLOS, E. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, v. 3, 2013.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1988. v. 13.

TWINE, T. E. et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and forest meteorology**, Elsevier, v. 103, n. 3, p. 279–300, 2000.

VAROTSOS, C. A.; TZANIS, C. G.; SARLIS, N. V. On the progress of the 2015–2016 el niño event. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 16, n. 4, p. 2007–2011, 2016.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 106, n. 447, p. 85–100, 1980.

WILCZAK, J. M.; ONCLEY, S. P.; STAGE, S. A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. **Boundary-layer meteorology**, Springer, v. 99, p. 127–150, 2001.

WILSON, K. B. et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. **Agricultural and forest Meteorology**, Elsevier, v. 106, n. 2, p. 153–168, 2001.

WUTZLER, T. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with reddyproc. **Biogeosciences**, Copernicus GmbH, v. 15, n. 16, p. 5015–5030, 2018.

YIM, M. H.; JOO, S. J.; NAKANE, K. Comparison of field methods for measuring soil respiration: a static alkali absorption method and two dynamic closed chamber methods. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 170, n. 1-3, p. 189–197, 2002.

ZELLWEGER, C. et al. Assessment of recent advances in measurement techniques for atmospheric carbon dioxide and methane observations. **Atmospheric Measurement Techniques**, Copernicus GmbH, v. 9, n. 9, p. 4737–4757, 2016.