

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

Tiago Bremm

**ANÁLISE DOS FLUXOS DE CO_2 ENTRE A SUPERFÍCIE E A
ATMOSFERA EM DIFERENTES TIPOS DE MANEJO PASTORIL NO
BIOMA PAMPA NO SUL DO BRASIL**

Santa Maria, RS
2019

Tiago Bremm

**ANÁLISE DOS FLUXOS DE CO_2 ENTRE A SUPERFÍCIE E A ATMOSFERA EM
DIFERENTES TIPOS DE MANEJO PASTORIL NO BIOMA PAMPA NO SUL DO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Geociências, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia.**

ORIENTADORA: Prof.^a Débora Regina Roberti

Santa Maria, RS
2019

Bremm, Tiago

ANÁLISE DOS FLUXOS DE CO₂ ENTRE A SUPERFÍCIE E A
ATMOSFERA EM DIFERENTES TIPOS DE MANEJO PASTORIL NO
BIOMA PAMPA NO SUL DO BRASIL / Tiago Bremm.- 2019.

75 f.; 30 cm

Orientadora: Débora Regina Roberti

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2019

1. Bioma Pampa 2. Manejo pastoril 3. Fluxos de massa
e energia I. Roberti, Débora Regina II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2019

Todos os direitos autorais reservados a Tiago Bremm. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Ernesto Pereira, n. 720

End. Eletr.: bremm.tiago@gmail.com

Tiago Bremm

**ANÁLISE DOS FLUXOS DE CO₂ ENTRE A SUPERFÍCIE E A ATMOSFERA EM
DIFERENTES TIPOS DE MANEJO PASTORIL NO BIOMA PAMPA NO SUL DO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Geociências, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia.**

Aprovado em 26 de fevereiro de 2019:

Débora Regina Roberti, Dra. (UFSM)
(Presidenta/Orientadora)



Valério De Patta Pillar (Videoconferência), Dr. (UFRGS)

Vanessa de Arruda Souza, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

Tiago Bremm

**ANÁLISE DOS FLUXOS DE CO_2 ENTRE A SUPERFÍCIE E A ATMOSFERA EM
DIFERENTES TIPOS DE MANEJO PASTORIL NO BIOMA PAMPA NO SUL DO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Geociências, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia.**

Aprovado em 26 de fevereiro de 2019:

Débora Regina Roberti, Dra. (UFSM)
(Presidenta/Orientadora)

Valério De Patta Pillar (Videoconferência), Dr. (UFRGS)

Vanessa de Arruda Souza, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

*Agradeço à minha família, pelo apoio e palavras de força nas horas mais difíceis.
À companheira e amiga Cristiane, por sua paciência, sempre me ouvindo e me aconselhando.*

À minha orientadora, Profa. Débora Regina Roberti, agradeço pelo suporte e ensinamentos.

Aos colegas do Laboratório de Micrometeorologia da UFSM - LUMET, pelo companheirismo e parceria, faça chuva ou faça sol.

Agradeço ainda às agências financiadoras Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro e bolsa de mestrado.

Eu dou trabalho para quem comigo trabalha. Eu existo, logo, eu dou trabalho para quem insiste que eu não trabalho. Eu funciono. Eu provo que ele existe. Eu sou Eddy.

(Tiago Bremm)

RESUMO

ANÁLISE DOS FLUXOS DE CO_2 ENTRE A SUPERFÍCIE E A ATMOSFERA EM DIFERENTES TIPOS DE MANEJO PASTORIL NO BIOMA PAMPA NO SUL DO BRASIL

AUTOR: Tiago Bremm

ORIENTADORA: Débora Regina Roberti

O Bioma Pampa é o segundo menor bioma do Brasil ocupando cerca de 2,07% do território nacional. No Rio Grande do Sul, o Pampa ocupa 63% do território, o que favorece a pecuária, atividade que contribui fortemente com a economia do estado. As emissões do setor agropecuário no Brasil vêm crescendo nas últimas décadas impulsionadas pelo aumento do rebanho bovino. Com este aumento, a pecuária e o manejo do gado devem aprimorar sua produtividade sem desbalancear a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Diferentes tipos de manejo pastoril sobre o Bioma Pampa têm sido incentivados para diminuir o impacto do crescente aumento da produção animal nas emissões dos GEE. Neste sentido, este trabalho pretende estimar os fluxos de CO_2 de diferentes manejos pastoris no sul do Brasil utilizando a técnica da Covariância dos Vórtices Turbulentos para determinação dos fluxos. No período de estudo foram analisados dois grupos pareados. *Grupo 1*: manejo rotativo (MR) - manejo contínuo conservativo (MC); *Grupo 2*: manejo rotativo (MR) - manejo diferido (MD). As áreas dentro do footprint do *Grupo 1* foram consideradas fontes de CO_2 para a atmosfera, com emissão de $199\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ pela área em MR e $243\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ pela área em MC ao final do período analisado, 121 dias. As áreas dentro da região do footprint do *Grupo 2* se comportaram como sumidouros de CO_2 , com absorção de $1183,3\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ pela área sob MD e $599,3\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ em MR, ao final dos 244 dias analisados. A presença do gado na região do footprint das torres de fluxo afetou de maneira negativa a absorção de CO_2 , o que indica que períodos de descanso no pastejo dos poteiros influenciam na dinâmica dos fluxos. Esses resultados são importantes para conscientização sobre a preservação da vegetação natural do Pampa e podem ainda ser utilizados na entrada de modelos agrícolas e climáticos.

Palavras-chave: Bioma Pampa. Manejo pastoril. Fluxos de CO_2 .

ABSTRACT

ANALYSIS OF CO_2 FLUXES BETWEEN THE SURFACE AND THE ATMOSPHERE IN DIFFERENT TYPES OF PASTORAL SYSTEMS IN THE PAMPA BIOME IN SOUTHERN BRAZIL

AUTHOR: Tiago Bremm
ADVISOR: Débora Regina Roberti

The Pampa Biome is the second smallest biome in Brazil occupying about 2.07% of the national territory. In Rio Grande do Sul state, the Pampa occupies 63% of the territory, which favors cattle raising, an activity that contributes heavily to the state's economy. Emissions from the agricultural sector in Brazil have been increasing in the last decades driven by the increase of the bovine herd. With this increase, livestock management and production system should improve their yield without unbalance the emission of greenhouse gases (GHG). Different types of livestock systems on the Pampa Biome have been encouraged to mitigate the impact of increasing animal production on GHG emissions. In this sense, this work intends to compare the flows of CO_2 under three different cattle grazing management systems in the south of Brazil using the Eddy Covariance technique to determine the fluxes. In the study period, two paired groups were analyzed. Group 1: multi-paddock, rotational grazing (MR) - continuous conservative grazing (MC); Group 2: multi-paddock, rotational grazing (MR) - deferral management (MD). Areas within the *Group 1* footprint region were considered to be CO_2 sources for the atmosphere, with issuance of $199\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ by the MR area and $243\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ by the MC area at the end of the analyzed period, 121 days. Areas within the *Group 2* footprint region behaved as CO_2 sinks, with uptake of $1183,3\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ by the MD area and $599,3\text{ g }CO_2\text{ m}^{-2}$ in MR at the end of the 244 days analyzed. The presence of cattle in the flux towers footprint region negatively affected the absorption of CO_2 , which indicates that periods of rest in the grazing of the paddocks influence the dynamics of the fluxes. These results are important to raise awareness about the preservation of the natural vegetation of the Pampa and can still be used in the entry of agriculture and climate models.

Keywords: Pampa biome. Livestock management systems, CO_2 fluxes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Região Sul do Brasil destacando a vegetação campestre dos Campos Sulinos. Os Campos Sulinos incluem áreas nos biomas Pampa e Mata Atlântica.	13
Figura 2.2 – Representação do fluxo de ar no ecossistema, formado por pequenos e grandes vórtices fluindo horizontalmente.	15
Figura 2.3 – Movimento das parcelas de ar em dois instantes de tempo. Com as medidas de velocidade vertical e outro escalar (temperatura, densidade, concentração) pode-se calcular o fluxo vertical desejado.	15
Figura 2.4 – Fluxos de energia entre a superfície e a atmosfera. Durante o dia, a radiação de onda curta aquece a atmosfera, enquanto que no período noturno o fluxo de calor é do solo para a atmosfera.	19
Figura 2.5 – Fluxograma do algoritmo de preenchimento proposto por Reichstein et al. (2005).	25
Figura 3.1 – Mapa do estado do RS com a localização do sítio experimental no sudoeste do estado, representado pelo ponto vermelho.	27
Figura 3.2 – Sítio experimental com os 3 blocos (Blocos 1, 2 e 3) e os três tratamentos, i.e., Rotativo, Contínuo Conservativo, e Diferido (identificado como "Convencional", pois até meados de 2017 foi submetido ao manejo pastoril convencional da propriedade). Fonte: (BAGGIO, 2017).	28
Figura 3.3 – Fotos das torres instaladas no sítio experimental. As fotos (a) e (b) foram tiradas em épocas diferentes, o que pode ser observado pela diferença na fisionomia da vegetação entre os tratamentos.	30
Figura 3.4 – Dados de alta frequência obtidos da Torre 3. Concentração de CO_2 ($mmol\ m^{-3}$), velocidade vertical do vento w ($m\ s^{-1}$), temperatura virtual (C) e concentração de vapor de H_2O ($mmol\ m^{-3}$).	32
Figura 3.5 – Dados processados e a existência de picos nas medidas.	33
Figura 4.1 – Variáveis meteorológicas para o sítio de Aceguá. a) Precipitação diária acumulada - Prec ($mm\ d^{-1}$); b) radiação global incidente - R_g (Wm^{-2}); c) temperatura do ar - T ($^{\circ}C$); d) umidade relativa do ar - RH (%); e) velocidade média do vento - v (ms^{-2}). A linha vermelha pontilhada representa o valor médio encontrado e a linha azul a normal climatológica da cidade de Bagé.	37
Figura 4.2 – Variáveis meteorológicas para as três torres localizadas em unidades experimentais submetidas aos diferentes tratamentos de manejo pastoril (Rotativo, Contínuo Conservativo, Diferido) do sítio experimental de Aceguá. a) Radiação de onda longa emitida pela superfície - $R_{L\uparrow}$ ou R_{Lup} (Wm^{-2}); b) radiação de onda curta refletida pela superfície - $R_{S\uparrow}$ ou R_{Sup} (Wm^{-2}); c) velocidade de fricção - u^* (ms^{-1}); d) umidade do solo a 10 cm - US (%)	39
Figura 4.3 – Rosa dos ventos, contribuição relativa e cumulativa e footprint para a torre localizada em MR.	41
Figura 4.4 – Rosa dos ventos, contribuição relativa e cumulativa e footprint para a torre localizada em MC.	43
Figura 4.5 – Rosa dos ventos, contribuição relativa e cumulativa e footprint para a torre localizada em MD.	44

Figura 4.6 – Diagrama da dispersão de energia disponível versus fluxos turbulentos para todos os dados disponíveis em cada Torre. A linha azul representa o ajuste linear. A linha vermelha representa 1:1.	45
Figura 4.7 – Composição do relevo com a localização das Torres no sítio experimental de Aceguá.	46
Figura 4.8 – Fluxos turbulentos do sítio experimental. a1), a2) fluxo de calor sensível - H (Wm^{-2}); b1), b2) fluxo de calor latente - LE (Wm^{-2}).	48
Figura 4.9 – Energia disponível para o sítio experimental. c1), c2) fluxo de calor no solo - G (Wm^{-2}); d1), d2) saldo de radiação líquida (Wm^{-2}).	49
Figura 4.10 – Fluxo de CO_2 para as áreas de footprint de três torres localizadas em unidades experimentais submetidas a diferentes tipos de manejo pastoril (Rotativo, Contínuo Conservativo, Diferido) do sítio experimental. As faixas azuis representam o período com gado dentro da região do footprint da unidade experimental submetida ao tratamento MR. As faixas verdes representam período com gado dentro do footprint da unidade experimental submetida ao tratamento MD.	50
Figura 4.11 – Ciclo médio diário do fluxo de CO_2 para nove períodos de duas semanas de avaliação (a-i) para o <i>Grupo 1</i> . A linha pontilhada azul representa a média dos fluxos para MR e a vermelha para MC.	54
Figura 4.12 – Ciclo médio diário para seis períodos de duas semanas de avaliação (a, b, i, j-l) para a segunda metade do <i>Grupo 2</i> . A linha pontilhada azul representa a média dos fluxos para MR e a vermelha para MC.	56
Figura 4.13 – Ciclo médio diário para seis períodos de duas semanas de avaliação (m-r) para a segunda metade do <i>Grupo 2</i> . A linha pontilhada azul representa a média dos fluxos para MR e a vermelha para MC.	57
Figura 4.14 – Fluxo de CO_2 para as áreas dos footprints das torres submetidas a diferentes manejos pastoris (Rotativo, Contínuo Conservativo, Diferido) do sítio experimental PELD de Aceguá. As faixas azul e verde representam o período com gado dentro da região do footprint da torre.	59
Figura 4.15 – Soma cumulativa de CO_2 para o <i>Grupo 1</i> . Cada quadro representa uma das faixas com dados da Figura 4.10.	60
Figura 4.16 – Evapotranspiração (ET) para os dois Grupos do sítio experimental.	61
Figura 4.17 – Média diária das componentes do balanço de energia para as torres em MR, MC e MD, respectivamente.	62
Figura 4.18 – Razão de Bowen para MR e MD. A linha azul pontilhada representa a média de β para a torre em MR e a linha verde em MD.	63
Figura 4.19 – Partição do fluxo de CO_2 líquido (NEE) em produção primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (R_{eco}) para: a) MR; b) MC; c) MD. ..	65
Figura 4.20 – CO_2 acumulado no período estudado para: a) MR; b) MC; c) MD. Com o preenchimento das falhas (em sua maioria de fluxo positivo, devido à falhas no período noturno), a soma acumulada é diferente para os dados não preenchidos (Figura 4.14). Para o particionamento dos fluxos, determinação da soma acumulada de CO_2 e estimativa de fonte e/ou sumidouro de C da atmosfera, as metodologias de preenchimento de dados são fundamentais e mundialmente utilizadas.	66
Figura 4.21 – CO_2 acumulado para período estudado para as áreas submetidas aos tratamentos: a) MR; b) MD.	67
Figura 4.22 – Soma acumulada da diferença do fluxo de CO_2 : a) MC-MR; b) MR-MD.	

As faixas azuis representam gado na região do footprint em MR e as verdes em MD. A linha azul representa o ajuste linear.	68
Figura 4.23 – Soma acumulada da diferença do fluxo de CO_2 : a) 15/09 a 05/11; b) Período 1 15/09 a 05/11 e Período 2 08/12 a 12/01.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Variáveis medidas, altura de instalação e modelo dos sensores instalados no sítio experimental de Aceguá.	31
Tabela 3.2 – Porcentagem de dados do fluxo de CO_2 removidos em cada etapa do controle de qualidade.....	34
Tabela 4.1 – Normais climatológicas de precipitação e temperatura para Bagé 1981 - 2010 e médias mensais para o sítio experimental.....	36
Tabela 4.2 – Período de análise e valores médios de temperatura (Temp °C), precipitação acumulada (Prec mm), fluxo de CO_2 para cada Grupo.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.0.1	OBJETIVOS	12
1.0.1.1	<i>Geral</i>	12
1.0.1.2	<i>Específicos</i>	12
2	REVISÃO TEÓRICA	13
2.0.1	Campos Sulinos - bioma Pampa	13
2.0.2	Técnica da Covariância dos Vórtices	14
2.0.3	Partição dos fluxos	17
2.0.4	Balço de Energia na Superfície	18
2.0.4.1	<i>Fluxos de Energia</i>	18
2.0.4.2	<i>Balço de energia</i>	20
2.0.4.3	<i>Evapotranspiração</i>	22
2.0.5	Preenchimento de falhas	23
2.0.5.1	<i>Métodos de preenchimento de falhas</i>	24
2.0.6	Footprint	26
3	METODOLOGIA	27
3.0.1	Descrição do Sítio	27
3.0.2	Período de análise dos dados	28
3.0.3	Instrumentação	29
3.0.4	Processamento dos dados	32
4	RESULTADOS	36
4.0.1	Condições ambientais	36
4.0.1.1	<i>Footprint do sítio</i>	40
4.0.2	Fechamento do balanço de energia	45
4.0.3	Dinâmica dos fluxos superficiais	46
4.0.3.1	<i>Componentes do balanço de energia</i>	46
4.0.3.2	<i>Fluxos de CO₂</i>	49
4.0.3.3	<i>Ciclo médio de CO₂ bissetimanal</i>	51
4.0.4	Soma cumulativa	58
4.0.4.1	<i>Evapotranspiração</i>	60
4.0.5	Fluxos depois de preenchidos	61
4.0.5.1	<i>Médias diárias</i>	62
4.0.5.2	<i>Razão de Bowen</i>	63
4.0.5.3	<i>Partição dos fluxos de CO₂</i>	64
4.0.5.4	<i>Comparação da soma acumulada entre os manejos</i>	67
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) são motivo de constante debate na comunidade mundial. Nas últimas décadas foram registrados aumentos preocupantes nos índices dos GEE, tais como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso (CO_2 , CH_4 e N_2O) em diversos setores. Só o setor de Agricultura, Florestas e uso da Terra (AFOLU) é responsável por um quarto da emissão global de CO_2 equivalente, 10-12 $Gt CO_2eq ano^{-1}$ (SMITH et al., 2014). No Brasil, por exemplo, o setor agropecuário era responsável por 14% da emissão total de CO_2 equivalente em 2005, passando a 33% da emissão em 2015 (CIÊNCIA, 2016). O setor de AFOLU possui papel importante na produção de alimentos e desenvolvimento sustentável no Brasil e no mundo. Estima-se um aumento populacional de 33% até 2050 (United Nations, 2013), enquanto a área total cultivada no mundo não mudou desde 1991, o que torna necessário aumento de produtividade e eficiência no uso da terra (O'MARA, 2012).

A emissão de GEE do setor agropecuário no Brasil vem crescendo nas últimas décadas. Em 2010, 93,9% do total de emissões de metano foram atribuídas à pecuária (CLIMA, 2016). Esse aumento nas emissões se deve principalmente ao aumento do rebanho bovino brasileiro que, em 2018, foi estimado em 232,35 milhões de cabeças (AGRICULTURE, 2018). O Brasil é o maior exportador mundial de carne bovina. O Rio Grande do Sul possui rebanho de aproximadamente 13,6 milhões de cabeças em uma área de 11,7 milhões de ha, o que representa 53,7% da sua área territorial (SEAPI, 2018).

Diferentes tipos de manejo do gado têm sido incentivados para diminuir o impacto do crescente aumento da produção animal nas emissões dos GEE (ROJAS-DOWNING et al., 2017). Estudos recentes indicam que a influência do gado é benéfica no fluxo de CO_2 . Pastagens naturais com a presença do gado em intervalos regulares e período de descanso entre o pastejo, torna este ecossistema sumidouro de carbono da atmosfera (GOMEZ-CASANOVAS et al., 2018). Em contrapartida, pastagens naturais intocadas, sem pastejo de animais, são consideradas neutras e/ou até mesmo fontes de CO_2 para a atmosfera (BERGER et al., 2019; KANG et al., 2013). Gomez-Casanovas et al. (2018) considera ainda o CH_4 emitido pelos animais durante o período de pastejo e, considerando o balanço entre absorção de CO_2 e emissão de metano, pastagens naturais sem adubação são consideradas sumidouro de carbono da atmosfera.

O Rio Grande do Sul é formado em sua maioria pelo Bioma Pampa que ocupa 2,07% do território nacional e 63% do território do estado. O Pampa possui vegetação composta principalmente por gramíneas, arbustos e árvores de pequeno porte (dependendo do tipo de pastejo) (PILLAR; LANGE, 2015), o que favorece a pecuária no estado e contribui de maneira significativa em sua economia. Investigar e quantificar os fluxos de CO_2 em diferentes manejos pastoris para produção pecuária contribuirá para a cons-

cientização e preservação do bioma Pampa. Mudanças simples no manejo pastoril em conjunto com utilização consciente deste ecossistema podem contribuir significativamente para mitigação da emissão de GEE e consolidação de um sistema de produção sustentável (PILLAR, 2009; PILLAR; TORNQUIST; BAYER, 2012).

Neste sentido, este trabalho pretende comparar os fluxos de CO_2 em diferentes manejos pastoris no bioma Pampa do sul do Brasil. Também serão investigados as trocas de energia e água (fluxos superficiais) e suas interações com as variáveis ambientais. Os fluxos superficiais são obtidos pela técnica da Covariância dos Vórtices Turbulentos (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012).

1.0.1 OBJETIVOS

1.0.1.1 Geral

Analisar os fluxos de CO_2 no ecossistema em três diferentes manejos pastoris de produção pecuária no bioma Pampa.

1.0.1.2 Específicos

Determinar o fechamento do balanço de energia para as áreas nos diferentes manejos.

Comparar as trocas de CO_2 com preenchimento e sem preenchimento de falhas nos diferentes tipos de manejo pastoril.

Estimar a influência do gado nos fluxos de CO_2 .

Calcular as trocas de água e energia no ecossistema.

Determinar as forçantes da variabilidade de CO_2 nos diferentes tipos de manejo pastoril.

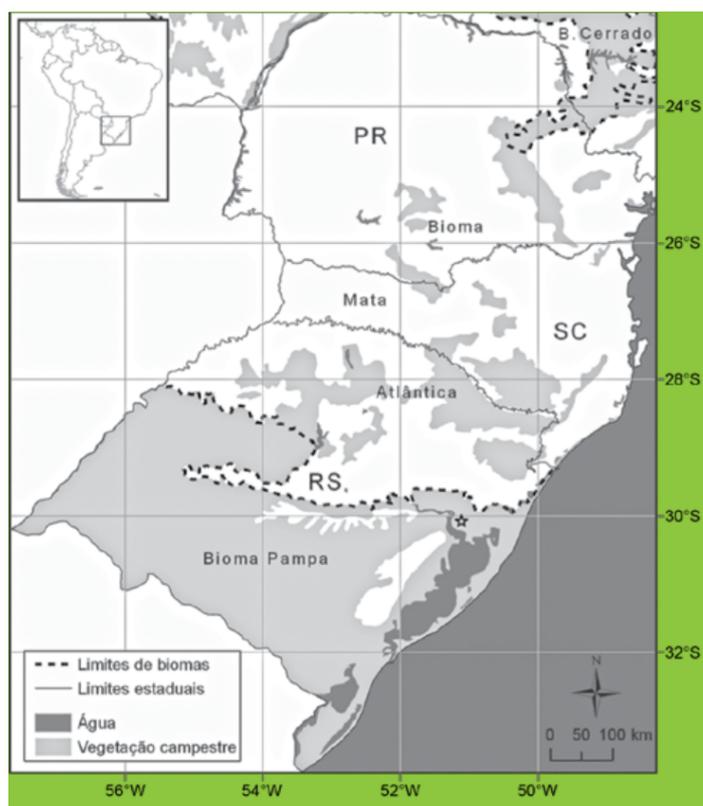
2 REVISÃO TEÓRICA

2.0.1 Campos Sulinos - bioma Pampa

O termo Campos Sulinos denomina a região campestre nos três estados da região Sul do Brasil (Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR)) e ocupa cerca de 7% da superfície terrestre brasileira (PILLAR; LANGE, 2015).

Os Campos Sulinos fazem parte de dois biomas diferentes: na metade sul e oeste do RS o bioma Pampa; na porção norte do RS e nos estados de SC e PR o bioma Mata Atlântica, Figura 2.1 (PILLAR; LANGE, 2015).

Figura 2.1 – Região Sul do Brasil destacando a vegetação campestre dos Campos Sulinos. Os Campos Sulinos incluem áreas nos biomas Pampa e Mata Atlântica.



Fonte: (PILLAR; LANGE, 2015).

O bioma Pampa ocupa uma área de 176.496 km^2 do território brasileiro (IBGE, 2004), 63% do território do RS, e possui vegetação formada por aproximadamente 2150 espécies de plantas pertencentes a cerca de 89 famílias. Essa vegetação natural é fonte de forragem na atividade pastoril de produção pecuária, e possui grande importância econômica na região Sul do Brasil, em especial no Rio Grande do Sul (RS) (PILLAR; LANGE, 2015). O Pampa apresenta clima subtropical com precipitação média anual de 1300 mm

distribuídos regularmente ao longo do ano. O clima, solo e relevo influenciam na distribuição das espécies na escala regional, mas o manejo é fundamental para definir as diferentes fisionomias campestres locais (PILLAR, 2009). A conversão de campos nativos em lavouras, em silvicultura ou em pastagens cultivadas é uma preocupação, já que o Pampa é o segundo bioma mais devastado do Brasil, restando apenas 36% de sua área original (MMA/IBAMA, 2010). Modificar a cobertura nativa do solo desfavorece a manutenção da matéria orgânica e pode fazer com que ocorra liberação de carbono para a atmosfera.

2.0.2 Técnica da Covariância dos Vórtices

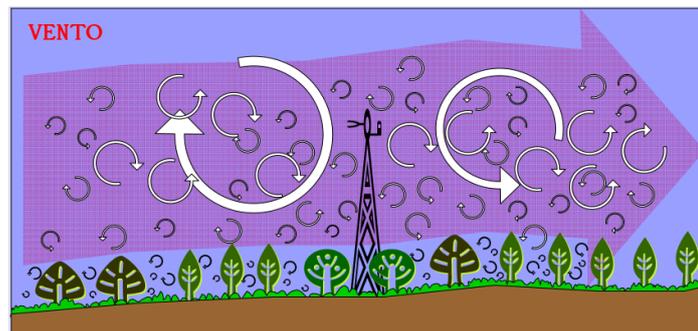
A Técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos (EC, do inglês, *Eddy Covariance*) foi proposta por Montgomery (MONTGOMERY, 1948), Swinbank (SWINBANK, 1951) e Obukhov (OBUKHOV, 1951 apud AUBINET; VESALA; PAPAŁE, 2012) para medição dos fluxos de calor, massa e momento entre uma superfície plana, horizontalmente homogênea e a atmosfera. Nessas condições, o transporte líquido entre a superfície e a atmosfera é unidimensional e a densidade de fluxo vertical pode ser calculada pela covariância entre flutuações turbulentas do vento vertical e a variável de interesse (AUBINET; VESALA; PAPAŁE, 2012).

Com o desenvolvimento dos anemômetros sônicos e dos analisadores de gás infravermelho, em meados de 1990, a técnica passou a ser utilizada para medições das trocas de dióxido de carbono e vapor de água entre o ecossistema e a atmosfera (AUBINET; VESALA; PAPAŁE, 2012). Para a atmosfera estável, as medidas são realizadas por torres micrometeorológicas de até cerca de 20 metros de altura (STULL, 2012; GARRATT; HICKS, 1990). Os fluxos são aproximadamente constantes com a altura na camada mais superficial da atmosfera, portanto, as medidas realizadas nesta camada representam os fluxos das camadas subjacentes. Nesta região a turbulência atmosférica é o mecanismo de transporte dominante, o que justifica o uso da técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos para medir fluxos. O fluxo descreve, por exemplo, a quantidade de partículas que atravessam certa unidade de área em determinado tempo. É de grande importância o número de partículas que passam pela unidade de área, o tamanho dessas partículas e o tempo que levam para atravessá-la (BURBA, 2013).

O fluxo de ar pode ser imaginado como uma grande quantidade de vórtices fluindo horizontalmente. Cada vórtice possui 3 componentes de 3 dimensões (u , v , w), incluindo o movimento vertical do ar (Figura 2.2) (BURBA, 2013). Na Figura 2.2 o fluxo de ar é representado pela seta grande que passa pelos sensores instalados em uma torre e compreende vórtices de diferentes dimensões. Ao observarem-se dois vórtices que passam pela torre, conforme mostrado na Figura 2.3, verifica-se que em um momento 1, o vórtice move a parcela de ar 1 para baixo, com velocidade vertical w_1 . No mesmo ponto, em um

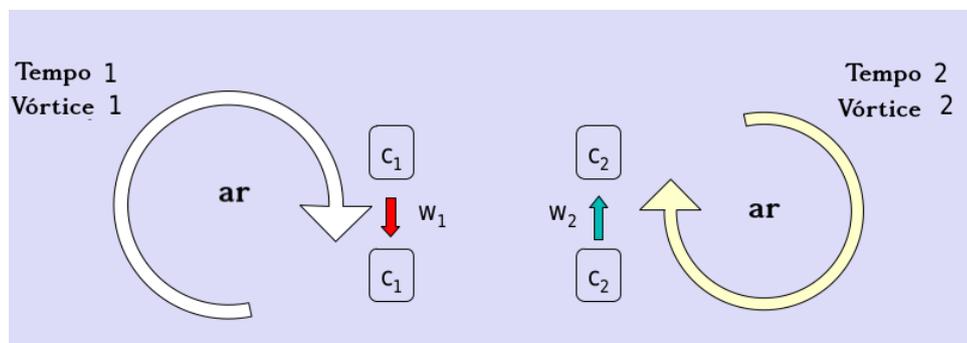
momento 2, o vórtice 2 move a parcela de ar c_2 para cima, com velocidade w_2 . Se medidas as características de cada parcela e as velocidades de movimento vertical, pode-se calcular o fluxo vertical, concentração, temperatura, umidade e demais grandezas medidas (BURBA, 2013). As medições das variáveis devem ser realizadas em alta frequência, no mínimo de 10 Hz, devido às rápidas mudanças nos fluxos turbulentos, densidade e temperatura.

Figura 2.2 – Representação do fluxo de ar no ecossistema, formado por pequenos e grandes vórtices fluindo horizontalmente.



Fonte: Adaptado de Burba (2013).

Figura 2.3 – Movimento das parcelas de ar em dois instantes de tempo. Com as medidas de velocidade vertical e outro escalar (temperatura, densidade, concentração) pode-se calcular o fluxo vertical desejado.



Fonte: Adaptado de Burba (2013).

O fluxo de um escalar qualquer pode ser definido como a média do produto entre a densidade do ar, a velocidade vertical do vento e a razão de mistura do gás de interesse

$$F = \overline{\rho_a w S} \quad (2.1)$$

onde ρ_a é a densidade do ar e S representa a razão de mistura do gás $S = \rho_c / \rho_a$, onde ρ_c é a densidade do gás.

Para descrever os movimentos turbulentos na atmosfera, é necessária a utilização da decomposição de Reynolds para separar os movimentos turbulentos em parte média e parte turbulenta. X representa uma grandeza qualquer.

$$X = \bar{X} + X' \quad (2.2)$$

A decomposição de Reynolds estabelece algumas regras na média dos fluxos turbulentos, conhecidos como postulados de Reynolds:

$$\begin{aligned} \overline{X'} &= 0 \\ \overline{XY} &= \overline{X\bar{Y}} + \overline{Y'X'} \\ \overline{X\bar{Y}} &= \overline{X\bar{Y}} \\ \overline{aX} &= a\bar{X} \\ \overline{X+Y} &= \bar{X} + \bar{Y} \end{aligned}$$

onde a é uma constante.

Dessa forma, a equação 2.1 pode ser escrita como:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a + \rho'_a)(\bar{w} + w')(\bar{S} + S')} \quad (2.3)$$

Efetuando as multiplicações e utilizando os postulados de Reynolds para as médias (média da parte turbulenta é nula), temos que:

$$F = (\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{S} + \bar{\rho}_a \overline{w' S'} + \bar{w} \overline{\rho'_a S'} + \bar{S} \overline{\rho'_a w'} + \overline{\rho'_a w' S'}) \quad (2.4)$$

Na técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos, geralmente, as flutuações de densidade são negligenciadas e a advecção é considerado desprezível para terrenos homogêneos (não há divergência ou convergência). Essas considerações permitem que a equação 2.4 possa ser reescrita como:

$$F = \overline{\rho_a w' S'} \quad (2.5)$$

Os instrumentos de medição geralmente não fazem medidas da razão de mistura, assim, assume-se que $\overline{\rho_a w' S'} = \bar{w}' \bar{\rho}_c$. Dessa forma, dependendo do escalar, os fluxos podem tomar a seguinte forma:

$$F_{H_2O} = \overline{w' \rho_{H_2O}} \quad (2.6)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w' T'} \quad (2.7)$$

onde F_{H_2O} é o fluxo de H_2O ($mmol m^{-2} s^{-1}$), ρ_{H_2O} é a densidade molar da água ($mmol m^{-3}$), H é o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$) ρ_a é a densidade do ar seco ($kg m^{-3}$), C_p é o calor específico do ar ($J kg^{-1} K^{-1}$) e T' é a temperatura medida pelo anemômetro sônico (K).

2.0.3 Partição dos fluxos

A técnica EC mede as trocas líquidas de energia e matéria entre a superfície e a atmosfera. O fluxo líquido de CO_2 (NEE, do inglês *Net Ecosystem Exchange*) é resultante do balanço de outras duas componentes: a produção primária bruta (GPP, do inglês *Gross Primary Production*), que representa a absorção de CO_2 através da fotossíntese, e a respiração do ecossistema (R_{eco}), que representa a emissão de CO_2 (REICHSTEIN et al., 2012) (LOVETT; COLE; PACE, 2006):

$$NEE = GPP + R_{eco} \quad (2.8)$$

sendo os fluxos da atmosfera para a biosfera considerados negativos por convenção meteorológica.

Os valores de GPP, por ser um reservatório de CO_2 , recebem sinal negativo durante o dia e são nulos durante o período noturno enquanto a R_{eco} , sendo um emissor de CO_2 , é sempre definida com sinal positivo. R_{eco} é a combinação da respiração proveniente de fontes autotróficas como organismos que utilizam a radiação solar como principal fonte de energia e fontes heterotróficas, dos quais a principal fonte de energia vem de outros organismos (REICHSTEIN et al., 2012). A equação 2.8 pode ser escrita como:

$$NEE = F_c^{EC} + F_c^{STO} = GPP + R_{eco} \quad (2.9)$$

onde F_c^{EC} é o fluxo turbulento de CO_2 no plano horizontal acima do dossel (positivo quando direcionado para a atmosfera) e F_c^{STO} é a mudança no armazenamento de carbono abaixo do plano horizontal do dossel (positivo quando aumenta). Dessa forma, absorção líquida de CO_2 faz com que NEE tenha sinal negativo.

Durante períodos noturnos a turbulência diminuiu e as hipóteses assumidas na equação 2.9 podem ser violadas. A transferência de massa entre a superfície e a atmosfera, que é aproximada como o fluxo vertical que atravessa o plano acima do ecossistema, somada ao acúmulo de concentrações abaixo desse plano, podem ser influenciadas por fluxos advectivos horizontais e verticais. Para corrigir os fluxos medidos em períodos com pouca turbulência e assegurar a qualidade dos dados, utiliza-se o filtro de velocidade de fricção (filtro de u^*) (AUBINET et al., 1999).

Um método muito empregado para modelar a R_{eco} utilizando a temperatura como fator dominante é dado pela equação 2.10

$$R_{eco} = R_{10} Q_{10}^{\frac{T - 10}{10}} \quad (2.10)$$

onde R_{10} é a respiração do ecossistema na temperatura de referência (10°C), T é a temperatura do ar e Q_{10} é o parâmetro de sensibilidade da temperatura, que descreve a resposta

da respiração a cada variação de 10°C na temperatura do ambiente (REICHSTEIN et al., 2005).

Outro método bastante utilizado para modelar a R_{eco} , apresentado por Reichstein et al. (2005), consiste em obter uma parametrização dos valores de respiração do solo utilizando um modelo empírico (2.11) baseado na equação de Arrhenius. O modelo é dado por:

$$R_{eco} = R_{10} \exp \left[E_0 \left(\frac{1}{283.15 - T_0} - \frac{1}{T - T_{ref}} \right) \right] \quad (2.11)$$

onde E_0 é a energia de ativação (°C) e $T_{ref} = 227,13K$ (- 46,02°C), conforme mostrado em Reichstein et al. (2005).

A R_{eco} apresenta boa relação com a temperatura do ar, entretanto o caráter intermitente da turbulência durante o período noturno pode dificultar a obtenção desta relação. Em função disso, Falge et al. (2001) e Gilmanov et al. (2003) propuseram encontrar o efeito da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) sobre o fluxo de CO_2 (NEE) para o período diurno. A função, na forma de uma hipérbole retangular (equação de Michaelis-Menten) é uma das formulações mais simples que expressa essa relação e é dada por:

$$NEE = \frac{\alpha_{RH} \beta_{RH} PAR}{\alpha_{RH} PAR + \beta_{RH}} + \gamma_{RH} \quad (2.12)$$

onde α_{RH} representa a inclinação inicial da curva de resposta à luz (eficiência com que a luz é utilizada pelo dossel), β_{RH} é a taxa máxima de CO_2 absorvida pelo dossel na saturação da luz e γ_{RH} é o ponto em que PAR é nulo e representa a R_{eco} . A radiação solar global incidente (R_g) pode ser utilizada para substituir PAR, na equação 2.12.

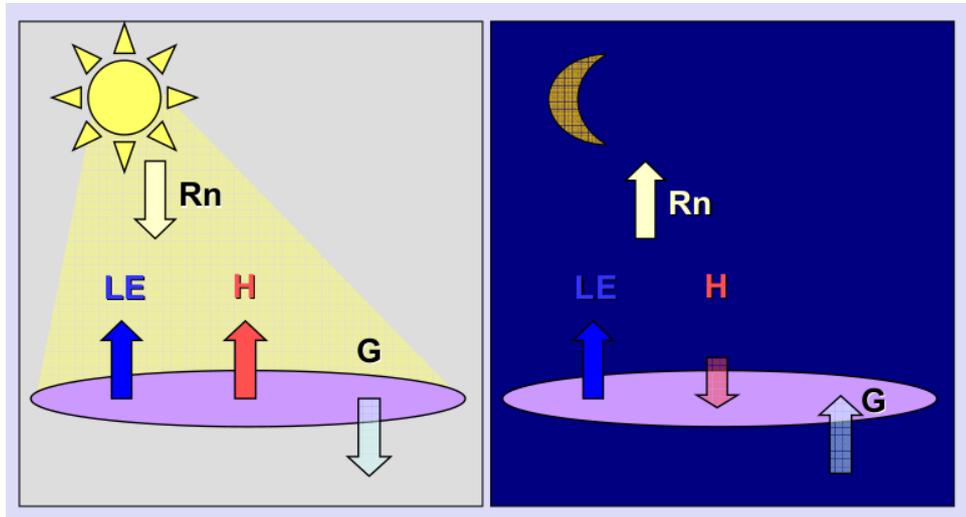
2.0.4 Balanço de Energia na Superfície

2.0.4.1 Fluxos de Energia

Existem essencialmente 4 tipos de fluxo de energia associados à superfície: a radiação líquida (R_N) para ou da superfície, fluxos de calor sensível (H) (direto) e latente (LE) (indireto) e os fluxos de calor no subsolo ($F_g = G + \Delta G$) (solo ou água). O fluxo de radiação líquida é resultante do balanço radiativo na superfície que, durante o dia, é usualmente dominado pela radiação solar e direcionado para a superfície, enquanto que no período noturno, sem incidência de radiação solar, é direcionado para a atmosfera. Como resultado dessas trocas de fluxo, durante o dia a superfície é aquecida e durante a noite ela se resfria (ARYA, 2001), conforme mostra a Figura 2.4.

O fluxo de calor direto ou sensível na camada de ar acima do solo tende a aumentar

Figura 2.4 – Fluxos de energia entre a superfície e a atmosfera. Durante o dia, a radiação de onda curta aquece a atmosfera, enquanto que no período noturno o fluxo de calor é do solo para a atmosfera.



Fonte: Adaptado de Burba e Anderson (2010).

devido às diferenças de temperatura entre a superfície do solo e a camada de ar acima (durante o dia). Nas imediações da interface solo-atmosfera, dentro da subcamada molecular, o modo primário de transferência de calor no ar é condução, análogo aos sólidos. Em distâncias maiores que alguns milímetros (espessura da subcamada molecular) da interface, o modo primário de trocas de calor passa a ser advecção ou convecção, envolvendo movimentos de ar. O fluxo de calor sensível é geralmente direcionado para a atmosfera durante o dia, quando a superfície é mais quente que o ar acima, e o contrário ocorre durante o período noturno (ARYA, 2001).

O fluxo de calor latente (ou fluxo de vapor de água) é resultado da evapotranspiração ou da condensação na superfície. Pode ser calculado pelo produto entre o calor latente de evaporação e a taxa de evaporação ou condensação. A evaporação ocorre quando o ar acima é mais seco, ou seja, possui menor umidade específica que o ar da imediação vizinha à superfície, o que ocorre usualmente em períodos diurnos. Por outro lado, a condensação sob a forma de orvalho pode ocorrer em clima relativamente mais frio, em períodos noturnos. A transferência de vapor de água através do ar não envolve troca de calor real, exceto onde ocorre mudança de fase entre a água líquida e o vapor. No entanto, a evaporação resulta em algum resfriamento da superfície, que no balanço de energia é representado pelo fluxo de calor latente da superfície para a atmosfera. A razão entre o fluxo de calor sensível e latente é conhecida como razão de Bowen (ARYA, 2001):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2.13)$$

2.0.4.2 Balanço de energia

Para representar o balanço de energia na superfície, assume-se uma fina camada entre solo (solo e água) e atmosfera (ar). Os fluxos de energia podem fluir da superfície para a fina camada ou da atmosfera para esta camada sem perda ou ganho de energia pela sua existência. Então, pelo princípio de conservação da energia na camada, temos:

$$R_N = H + LE + G \quad (2.14)$$

onde R_N é a radiação líquida, H e LE são os fluxos de calor sensível e latente e G é o fluxo de calor no solo. Por convenção de sinais, todos os fluxos radiativos direcionados para a superfície são positivos, enquanto os fluxos de energia não radiativos direcionados para longe da superfície são negativos (o sentido de alguns fluxos muda no período noturno), conforme mostra a Figura 2.4.

Durante o dia a superfície recebe radiação ($R_N > 0$), que é particionada em fluxo de calor sensível e latente para a atmosfera, e fluxo de calor para o solo (H , LE e G positivos). As magnitudes das componentes do balanço dependem de diversos fatores como sazonalidade, tipo de superfície, vegetação, clima dentre outros. Durante o período noturno a superfície perde energia. Essa perda de energia é compensada pelo ganho de energia do ar e, em certos períodos, do calor latente de condensação liberado durante o processo de formação de orvalho. A magnitude das componentes diurnas é maior que das noturnas, exceto por G . A magnitude de G não difere muito entre períodos noturnos e diurnos, embora a direção ou o sinal obviamente se inverta durante a manhã e períodos de transição noturnos, quando os outros fluxos também mudam de sinal, conforme mostra a Figura 2.4 (ARYA, 2001).

No balanço de energia do período diurno, os fluxos de calor sensível e latente provenientes da superfície ou direcionados para ela são claramente governados pela radiação líquida incidente. Pode-se interpretar a equação 2.14 em termos do particionamento da radiação líquida em outros fluxos (H , LE , G). A radiação líquida pode ser considerada uma forçante externa, enquanto que os fluxos de calor sensível, latente e do solo são respostas à essa forçante. Medidas líquidas deste particionamento são as razões entre H/R_N , LE/R_N e G/R_N , que devem depender das várias características da superfície, subsolo e meteorológicas (ARYA, 2001). Variações diurnas nestas razões são geralmente muito menores que os fluxos de cada componente, individualmente.

Em parametrizações mais simples, o fluxo de calor no solo é considerado proporcional à R_N através de uma relação de regressão empírica (DOLL; CHING; KANESHIRO, 1985 apud ARYA, 2001). A razão H/R_N é maior no período noturno ($R_N < 0$) do que para condições de período diurno ($R_N > 0$). A relação entre o fluxo de calor no solo e a radiação líquida permite determinar a soma entre H e LE simplesmente pela medição ou cálculo de R_N (ARYA, 2001). Dessa forma, em termos da razão de Bowen (equação 2.13),

pode-se determinar o fluxo de calor sensível e latente, através da equação 2.14 como:

$$LE = \frac{R_N - G}{1 + \beta} \quad (2.15)$$

$$H = \frac{\beta(R_N - G)}{1 + \beta} \quad (2.16)$$

O fluxo de radiação líquida (R_N) nas equações acima é resultado do balanço radiativo entre a radiação de onda curta (R_S) e de onda longa (R_L) nas proximidades da superfície:

$$R_N = R_S + R_L \quad (2.17)$$

Os termos da equação 2.17 também podem ser expressos como:

$$R_S = R_{S\downarrow} + R_{S\uparrow} \quad (2.18)$$

$$R_L = R_{L\downarrow} + R_{L\uparrow} \quad (2.19)$$

Reescrevendo R_N temos:

$$R_N = R_{S\downarrow} + R_{S\uparrow} + R_{L\downarrow} + R_{L\uparrow} \quad (2.20)$$

em que, as setas para baixo e para cima representam a radiação incidente e ascendente, respectivamente.

A radiação solar global incidente de onda curta ($R_{S\downarrow}$) é formada pela radiação solar direta e pela radiação difusa e é definida como insolação na superfície. A radiação de onda curta ascendente ($R_{S\uparrow}$) é uma fração da $R_{S\downarrow}$ que é refletida pela superfície.

$$R_{S\uparrow} = -aR_{S\downarrow} \quad (2.21)$$

onde a é o albedo.

A radiação de onda longa incidente $R_{L\downarrow}$ da atmosfera, na ausência de nuvens, depende fortemente da distribuição de vapor de água, temperatura e dióxido de carbono e não mostra significativa variação diurna. A radiação terrestre ascendente ($R_{L\uparrow}$), proporcional à quarta potência da temperatura da superfície em unidades absolutas, apresenta forte variação diurna, com valor máximo no início da tarde e mínimo ao amanhecer. Ambas as componentes possuem a mesma magnitude de grandeza, o que faz com que a radiação de onda longa líquida (R_L) seja, geralmente, uma quantidade pequena. Em períodos noturnos $R_{S\downarrow}$ é nulo, o que faz com que $R_N < 0$ implicando em resfriamento radiativo da superfície. (ARYA, 2001).

As componentes radiativas de onda longa ($R_{L\downarrow}$ e $R_{L\uparrow}$) podem ser calculadas pela

lei de Stefan Boltzmann. A radiação de onda longa emitida pela atmosfera é estimada de acordo com:

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \sigma T_S^4 \quad (2.22)$$

onde ϵ é a emissividade da atmosfera σ é a constante de Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_S é a temperatura da superfície, medida na torre.

A emissividade da atmosfera (ϵ_a) é estimada com a equação proposta por Bastiaanssen (1995):

$$\epsilon_a = 0,85(-\ln\tau)^{0,09} \quad (2.23)$$

onde τ é a transmitância da atmosfera dada por:

$$\tau = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (2.24)$$

e z é a altura da torre.

A radiação de onda longa emitida pela superfície para a atmosfera é estimada pela equação abaixo:

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_s \sigma T_S^4 \quad (2.25)$$

onde T_S é a temperatura da superfície em K e ϵ_s é estimado a partir do índice de área foliar. No caso de pixels com valor menor que zero, $\epsilon_s = 0,985$.

2.0.4.3 Evapotranspiração

O maior fluxo de matéria na biosfera é o movimento da água através do ciclo hidrológico (CHAHINE, 1992). A transferência de água do solo e superfícies através da evaporação e a perda de água das plantas através dos estômatos, transpiração, representa o maior movimento de água na atmosfera. Esses processos são conhecidos como evapotranspiração (ET). A taxa do conjunto evaporação + transpiração é controlada pelas condições atmosféricas do sítio experimental, pela energia disponível, disponibilidade hídrica e por fatores biológicos da planta (SUYKER; VERMA, 2008). A ET em termos do fluxo de energia na forma de calor latente, consome cerca de 50% da radiação solar absorvida pela superfície terrestre (TRENBERTH; FASULLO; KIEHL, 2009). Pode-se estimar a ET utilizando o calor latente de vaporização da água (λ em $J \text{ kg}^{-1}$) e o fluxo de calor latente (LE):

$$ET = \frac{\Delta t \cdot LE}{\lambda} \quad (2.26)$$

onde λ é o calor latente de vaporização da água ($2.45 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$) e Δt é o tempo (30 min).

2.0.5 Preenchimento de falhas

A técnica EC utiliza medidas de alta resolução temporal (10 Hz) para a determinação dos fluxos de energia entre a superfície e a atmosfera. Quando ocorrem quedas de energia, chuva intensa, vandalismo ou outro tipo de problema, as medidas não podem ser computadas e há perda de dados. Além disso, dados que não passam no controle de qualidade do pré e pós processamento dos fluxos são também removidos, o que aumenta o período com ausência de dados na série temporal. Devido à resolução de coleta de dados, o método EC disponibiliza uma quantidade imensa de dados, ocasionalmente medidos em situação similar de vegetação e condições meteorológicas, o que é fundamental para o preenchimento das falhas nas medidas e dados removidos pelos filtros (PAPALE, 2012).

Há diferentes métodos de preenchimento de dados que podem ser classificados de acordo com diferentes características (PAPALE, 2012):

-Princípio: Todas as técnicas de preenchimento de dados utilizam dados reais para preenchimento de falhas. Esse preenchimento pode ser baseado em técnicas empíricas ou no uso de modelos funcionais. No primeiro caso, não há suposições impostas na forma das relações entre as variáveis e os fluxos sendo os dados usados para encontrar essa relação e parametrizá-la. Nos modelos funcionais, o conhecimento sobre o processo em estudo é utilizado para prescrever a maneira como as variáveis e os fluxos são vinculados sendo os dados usados apenas para parametrizar essas funções.

-Forçantes: As forçantes são as variáveis que podem explicar ao menos parcialmente a variabilidade do fluxo medida pelo EC que necessita ser preenchida. Geralmente, as variáveis meteorológicas são utilizadas como forçantes na maioria dos métodos de preenchimento de dados, devido à sua influência nas respostas de carbono do ecossistema. $R_{S\downarrow}$, temperatura do ar e do solo, conteúdo de água no solo, precipitação e velocidade do vento são forçantes geralmente utilizados no preenchimento de dados.

-Variáveis simuladas: Além dos fluxos (CO_2 , H_2O , CH_4) e outras variáveis que podem ser medidas pelo EC, as variáveis meteorológicas também podem ser preenchidas, para obtenção de uma série completa que é necessária como parâmetro de entrada na maioria das técnicas de preenchimento de fluxos. Esse procedimento deve ser realizado com cuidado, pois erros e incertezas introduzidas nos fatores e nas variáveis simuladas podem ser aumentados no preenchimento dos fluxos.

2.0.5.1 Métodos de preenchimento de falhas

-*Mean Diurnal Variation (MDV)*: É uma técnica de interpolação baseada na auto-correlação temporal dos fluxos. As falhas são preenchidas pela média dos valores válidos medidos no mesmo horário (com até +/- 1h em torno do ponto), em dias adjacentes. O tamanho e a definição do período médio (janela) podem variar entre diferentes implementações. Em geral, recomenda-se um tamanho de janela não superior a 2 semanas, uma vez que, para períodos mais longos, a dependência não linear de variáveis ambientais poderia introduzir grandes incertezas e erros (FALGE et al., 2001).

O MDV não necessita de forçantes e é o único método que pode ser utilizado quando há ausência de dados meteorológicos. Seu desempenho e precisão são inferiores em comparação com os métodos a seguir, porém, sua implementação é mais simples.

-*Look-Up Tables (LUT)*: LUT é um método empírico que consiste em preencher as falhas utilizando médias das variáveis de fluxo para períodos com condições atmosféricas similares. Na prática, quando há falha nos fluxos, os valores são buscados em uma tabela multidimensional, baseado em condições meteorológicas como temperatura do ar, radiação e umidade relativa. Por exemplo, Falge et al. (2001) subdividiu o ano em 4 tabelas, referentes às estações do ano e utilizou a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD ou PAR) e a temperatura do ar como forçantes. Para cada estação foi definida uma margem de temperatura de 2°C (totalizando 35 faixas) e para PPFD uma margem de 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (23 faixas), totalizando 805 classes por período. Na ocorrência de falhas, procuram-se as mesmas condições de PPFD e temperatura do período faltante e utiliza-se o valor do fluxo referente à média dos valores da faixa encontrada. Falhas na tabela, onde não há dados de fluxo válidos para a combinação das duas forçantes são preenchidas com interpolação linear.

As forçantes utilizadas na preparação das tabelas devem ser selecionadas de acordo com as características do local, considerando as variáveis ambientais que são mais importantes para os processos de interesse. A seleção de muitas forçantes pode fazer com que não haja valor de fluxo para uma combinação de todas elas. Segundo Falge et al. (2001), a seleção de 3 a 4 variáveis dentre radiação incidente, radiação difusa, temperatura do ar e do solo, conteúdo de água no solo e déficit de pressão de vapor de água são suficientes.

Reichstein et al. (2005) propôs uma variação da técnica LUT através da implementação de uma janela móvel: MDS (do inglês *Marginal Distribution Sampling*). Somada à MDS, Reichstein et al. (2005) propõem uma rotina de preenchimento (Figura 2.5) que identifica 3 diferentes cenários:

(*Cenário 1*): Há falhas apenas nos fluxos de interesse, mas todas as variáveis meteorológicas estão disponíveis.

(*Cenário 2*): Além das falhas nos fluxos de interesse há falhas nos dados de VPD ou temperatura do ar, porém, os dados de radiação estão disponíveis.

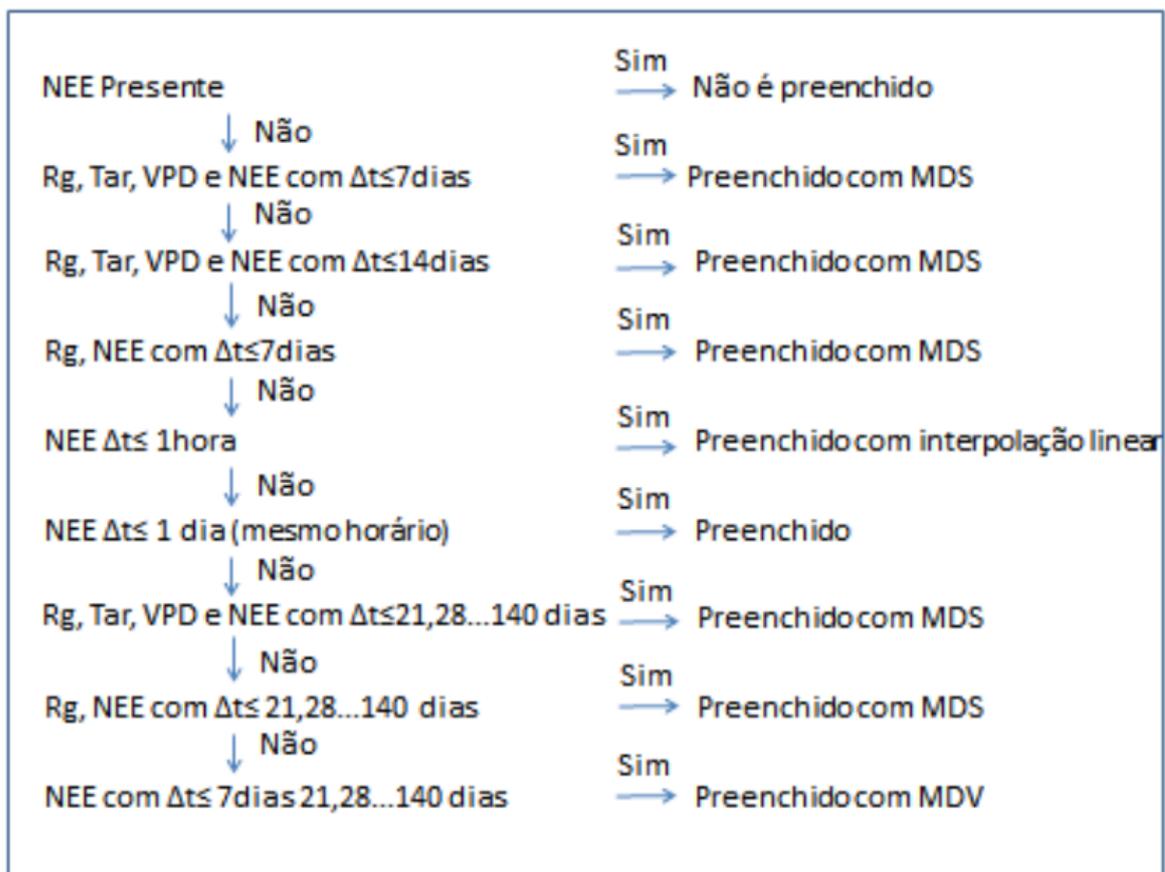
(Cenário 3): Há falhas nos fluxos e nas variáveis VPD, temperatura do ar e radiação.

Para o primeiro cenário, as falhas nos fluxos são preenchidas com as médias dos valores em condições meteorológicas similares para uma janela de +/- 7 dias. As condições meteorológicas são consideradas similares se R_g , T_{ar} e VPD não variam mais que 50 Wm^{-2} , $2,5^\circ\text{C}$ e 5 hPa , respectivamente. Caso não existam condições similares para a janela, esta é aumentada para +/- 14 dias.

No cenário 2 utiliza-se o mesmo procedimento, contudo, as condições meteorológicas são consideradas similares apenas se R_g variar menos que 50 Wm^{-2} . Neste cenário a janela não é aumentada caso não sejam encontrados valores de fluxo sob condições meteorológicas adequadas ao método.

O cenário 3 preenche a falha nos fluxos com o valor médio de fluxo do mesmo horário dos dias adjacentes (+/- 1 dia). Caso este valor também apresente falha, a janela é aumentada até o dado ser preenchido, conforme mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Fluxograma do algoritmo de preenchimento proposto por Reichstein et al. (2005).



Fonte: Adaptado de (REICHSTEIN et al., 2005).

Os dados preenchidos são classificados em 3 categorias (A, B, C) baseadas nos cenários e no tamanho da janela utilizada (REICHSTEIN et al., 2005).

2.0.6 Footprint

Considera-se como local ideal para a instalação de uma torre micrometeorológica ou torre de fluxo, um terreno plano e homogêneo, com cobertura de vegetação distribuída igualmente em toda a superfície. Além disso, o tamanho da área em que o sensor está instalado deveria ser suficientemente maior que a extensão da área que se deseja medir. Contudo, a maioria dos sítios não atende essas hipóteses, fazendo com que informações de rugosidade superficial sejam necessárias para a interpretação da área de contribuição do fluxo (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012).

O footprint de uma torre de fluxo pode ser definido como a determinação do campo de visão das torres. Ele deve ser determinado considerando o fluxo não homogêneo, devido à vegetação e terreno irregulares. Grande parte dos modelos empregados na determinação do campo de visão de torres micrometeorológicas são analíticos e, consideram apenas o fluxo homogêneo. Esses modelos, por serem mais simples, não exigem muita capacidade computacional e mesmo assim, resultam em boas estimativas. (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012).

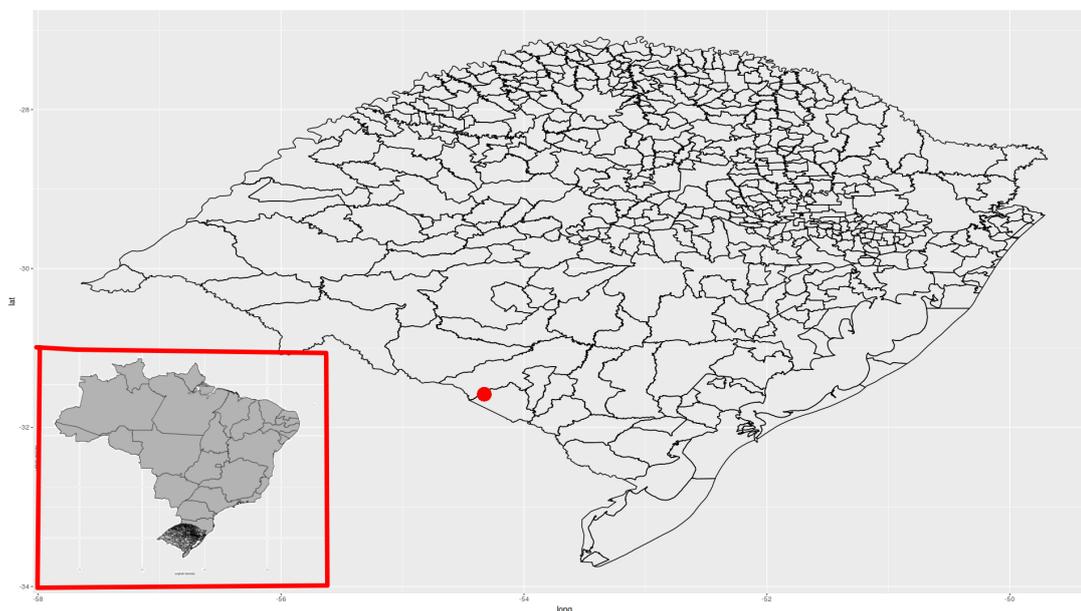
Neste trabalho foi utilizado o modelo analítico de footprint proposto por (KORMANN; MEIXNER, 2001) através da versão 1.0 do pacote FREddyPro (XENAKIS, 2016), utilizado no software R para computação estatística (R Core Team, 2018).

3 METODOLOGIA

3.0.1 Descrição do Sítio

O sítio experimental faz parte da rede PELD (Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração) e se localiza em uma propriedade particular no município de Aceguá (31° 39' 12.08"S; 54° 10' 30.68"O, 170 m de altitude), Figura 3.1. A vegetação é natural, caracterizada como campos nativos de solos profundos com predominância de gramíneas prostradas como o *Paspalum notatum*, *Axonopus fissifolius*, dos subarbustos *Baccharis crispa* (carqueja) e *Baccharis coridifolia* (mio-mio), da roseta espinhosa *Eryngium horridum* (gravatá ou caraguatá) e possui solo do tipo *Vertissolo* (BAGGIO, 2017). O clima na região pertence à zona do franco Cfa, temperado úmido com verão quente, de acordo com a classificação de Köppen (NIMER, 1989), com média climática anual de 1513,6 mm na região (Bagé) (Instituto Nacional de Meteorologia, 2018).

Figura 3.1 – Mapa do estado do RS com a localização do sítio experimental no sudoeste do estado, representado pelo ponto vermelho.

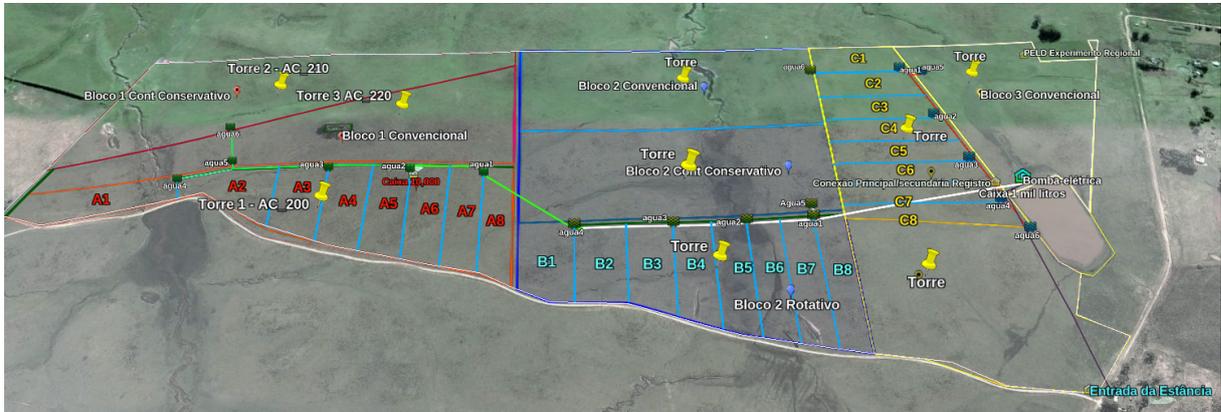


Fonte: Autor.

O experimento ocupa uma área de 160 ha e adota um delineamento experimental com três blocos casualizados, cada um dividido em três unidades experimentais (16 a 18 ha cada) submetidas a três tratamentos de manejo pastoril apresentados a seguir de acordo com Baggio (2017) e modificações posteriores:

Manejo rotativo (MR): o acesso do gado à pastagem é controlado através da divisão de cada unidade experimental em oito poteiros (A1 a A8). Cada poteiro passa por um

Figura 3.2 – Sítio experimental com os 3 blocos (Blocos 1, 2 e 3) e os três tratamentos, i.e., Rotativo, Contínuo Conservativo, e Diferido (identificado como "Convencional", pois até meados de 2017 foi submetido ao manejo pastoril convencional da propriedade). Fonte: (BAGGIO, 2017).



período de descanso visando o crescimento da vegetação após o período sob pastejo. No experimento, utiliza-se a soma térmica de 550 graus-dia como base para o período de descanso e a carga animal é ajustada mensalmente para uma oferta de forragem que, conforme a estação do ano, varia de 3,5 a 4,5 kg de matéria seca de biomassa aérea vegetal para cada kg de peso vivo total dos animais em cada unidade experimental.

Manejo contínuo conservativo (MC): o gado tem acesso à toda unidade experimental sem limitações, como geralmente são manejados os campos dessa região, mas a carga animal é ajustada de acordo a mesma oferta de forragem dos demais tratamentos.

Manejo diferido (MD): cada parcela experimental é dividida em 2 poteiros, os quais são utilizados pelos animais de maneira alternada a cada 550 graus-dia de descanso e com a mesma oferta de forragem dos demais tratamentos. Este tratamento teve início na primavera de 2017, e até então essas unidades experimentais foram manejadas de maneira contínua pelo produtor. A partir dessa data teve início o manejo pastoril com diferimento.

3.0.2 Período de análise dos dados

Com a disponibilidade de duas torres micrometeorológicas, foram analisados dados obtidos nas três parcelas experimentais do bloco 1, Figura 3.2. As torres foram instaladas inicialmente nas unidades experimentais submetidas aos tratamentos de manejo pastoril Rotativo (MR) e Contínuo Conservativo (MC), e posteriormente a deste último foi trocada para a unidade experimental submetida ao tratamento Diferido (MD). Assim foi possível o pareamento desses tratamentos em dois períodos diferentes:

Grupo 1: MR - MC. 121 dias de dados; 18 de janeiro a 19 de maio de 2018.

Grupo 2: MR - MD. 244 dias de dados; 19 de maio de 2018 a 18 de janeiro de 2019. O período de análise e as metodologias empregadas em cada manejo são descritas a seguir:

MR: os dados analisados correspondem ao período de 18 de janeiro de 2018 a 18 de janeiro de 2019. Para esta análise, determinou-se o fechamento do balanço de energia. Em seguida foram aplicadas as metodologias de preenchimento de falhas e a partição dos fluxos descritos acima, seção 2.0.5.1.

MC: o período de análise foi de 18 de janeiro de 2018 a 19 de maio de 2018, totalizando 121 dias. Determinou-se o fechamento do balanço de energia e subsequente fechamento de falhas e partição dos fluxos.

MD: o período analisado totaliza 244 dias, de 19 de maio de 2018 a 18 de janeiro de 2019. O fechamento do balanço de energia foi determinado e as falhas nos fluxos foram preenchidas. Com a série de dados completa os fluxos foram particionados.

A ET foi estimada para as três parcelas experimentais do bloco 1 sem a realização do fechamento do balanço de energia.

Na instalação das torres, em 18 de janeiro de 2018, ocorreu um problema nos sensores de radiação de onda longa em todos os manejos. O problema foi diagnosticado e corrigido em agosto de 2018. Todas as componentes radiativas de onda longa tiveram que ser descartadas até a correção do problema. Para este período as componentes de onda longa foram determinadas pelas equações 2.22 e 2.25.

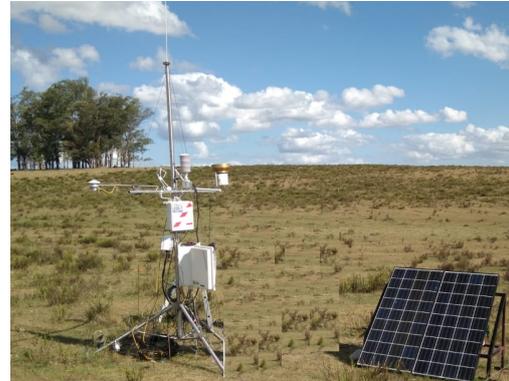
3.0.3 Instrumentação

Os dados utilizados no trabalho são obtidos de duas torres micrometeorológicas instaladas no sítio experimental. A Torre 1, Figura 3.3a, estava instalada no sistema rotativo (MR), conforme mostrado na Figura 3.2 e dispunha dos equipamentos mostrados na Tabela 3.1. A Torre 2 estava instalada no manejo contínuo conservativo (MC) no primeiro período de análise (Grupo 1), Figura 3.2. No segundo período de análise, os equipamentos da Torre 2 foram instalados na Torre 3, iniciando a análise dos fluxos na unidade experimental submetida ao tratamento de manejo Diferido (MD) (Grupo 2), Figura 3.3c. A Torre 2 e a Torre 3 são idênticas, portanto, a Torre 3 dispunha dos mesmos equipamentos, listados na Tabela 3.1. Devido à necessidade de medição das componentes de radiação de onda longa em conjunto com as de onda curta, no dia 18 de julho de 2018 foi adicionado um sensor de saldo de radiação CNR2 (Campbell Scientific) na Torre 3, que permaneceu até o final do período analisado.

Figura 3.3 – Fotos das torres instaladas no sítio experimental. As fotos (a) e (b) foram tiradas em épocas diferentes, o que pode ser observado pela diferença na fisionomia da vegetação entre os tratamentos.



(a) Torre 1 (AC 200).



(b) Torre 2 (AC 210).



(c) Torre 3 (AC 220).

Fonte: Autor.

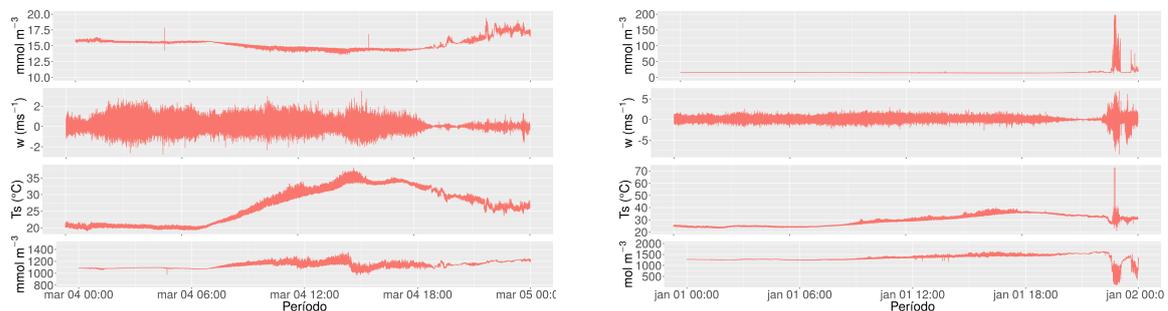
Tabela 3.1 – Variáveis medidas, altura de instalação e modelo dos sensores instalados no sítio experimental de Aceguá.

Variável	Sensor	Altura da medição	Período		
			Torre 1 AC 200 (MR)	Torre 2 AC 210 (MC)	Torre 3 AC 220 (MD)
Componentes do vento	CSAT3/ Campbell Scientific	2 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
			a	a	a
Concentração de vapor d' água e CO2	LI-7500 (LI-COR)	2 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
			a	a	a
Concentração de CH4	LI-7700 (LI-COR)	2 m	18/01/2018	-	-
			a	-	-
Temperatura do ar e umidade relativa	CS215-L Campbell Scientific	2 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
	HMP155 Vaisala	2 m	a	a	a
Precipitação	TR525USW/Texas Eletronics, Inc.	2 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
			a	a	a
Radiação solar incidente	CMP3	2 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
			-	a	a
Radiação solar refletida	CMP3	2 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
			a	a	a
Radiação de onda longa incidente	CGR3	2 m	18/01/2018	-	-
			a	-	-
Radiação de onda longa emitida	CGR3	2 m	18/01/2018	-	-
			a	-	-
Saldo de radiação	CNR2 Campbell-Scientific	2 m	18/01/2018	-	18/07/2018
			-	-	a
Fluxo de calor no solo	HFP01 Hukseflux	-0,1 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Temperatura do solo	T108/Campbell Scientific	-0,05 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Conteúdo de água no solo	ML2x CS616	-0,10 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Temperatura do solo	T108/Campbell Scientific	-0,15 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Fluxo de calor no solo	HFP01 Hukseflux	-0,25 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Conteúdo de água no solo	ML2x CS616	-0,30 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Temperatura do solo	T108/Campbell Scientific	-0,05 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Fluxo de calor no solo	HFP01 Hukseflux	-0,10 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Temperatura do solo	T108/Campbell Scientific	-0,15 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Fluxo de calor no solo	HFP01 Hukseflux	-0,25 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	
Conteúdo de água no solo	ML2x CS616	-0,30 m	18/01/2018	18/01/2018	19/05/2018
		a	a	a	

3.0.4 Processamento dos dados

Os dados foram obtidos com frequência de 10 Hz. Na Figura 3.4 são apresentados diferentes dias com situação particular nas medidas. Na figura 3.4a observam-se todas as variáveis com dados fisicamente possíveis, o que não ocorre na figura 3.4b, onde a existência de picos nas medidas, que não representam a física do fenômeno, podem causar problemas no cálculo dos fluxos.

Figura 3.4 – Dados de alta frequência obtidos da Torre 3. Concentração de CO_2 ($mmol\ m^{-3}$), velocidade vertical do vento w ($m\ s^{-1}$), temperatura virtual (C) e concentração de vapor de H_2O ($mmol\ m^{-3}$).



(a) Dados sem picos

(b) Dados com picos

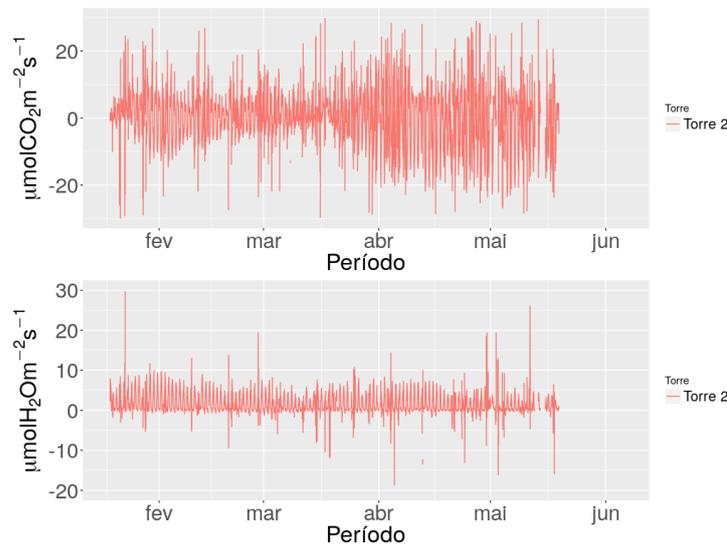
Fonte: Autor.

Os dados de alta frequência foram processados pelo software EddyPro[®], versão 6.2.1, Li-Cor (Lincoln, Nebraska, EUA) onde os fluxos de 30 minutos foram calculados. As configurações utilizadas para o processamento foram: cálculo das flutuações turbulentas em média por bloco de 30 minutos, rotação dupla (WILCZAK; ONCLEY; STAGE, 2001), correção para os efeitos da densidade (WEBB; PEARMAN; RG, 1980) e atenuação de fluxo devido à configuração instrumental. O software permite ainda a seleção de testes para avaliação da qualidade estatística dos dados de alta frequência, dos quais foram selecionados os seguintes testes: filtragem de picos (VICKERS; MAHRT, 1997), teste de amplitude e resolução, estatística do valor medido com o valor médio, teste de limites físicos possíveis e teste de descontinuidade das medidas. Esses testes estatísticos são salvos após o processamento pelo EddyPro com valores de 0 (passou no teste) a 2 (não passou no teste). Apenas a exclusão dos fluxos que não passaram no teste não é suficiente para eliminar os valores não físicos, os problemas na medição durante precipitação e os demais picos nos fluxos.

Os fluxos de 30 minutos calculados pelo EddyPro[®] ainda contêm picos que não representam medidas fisicamente possíveis, conforme mostrado na Figura 3.5. Esses valores ocorrem devido a intempéries como precipitação e ventos extremos que acabam interferindo nas medidas de vento e de concentração de gases pelos instrumentos (BURBA; ANDERSON, 2010). Outra situação em que os valores de fluxo podem não representar a realidade ocorre quando a turbulência é muito fraca (geralmente ocorre em períodos

noturnos), o que impossibilita a correta aplicação da técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos (AUBINET; VESALA; PAPAIE, 2012). Esses valores necessitam ser eliminados pelo controle de qualidade de dados.

Figura 3.5 – Dados processados e a existência de picos nas medidas.



Fonte: Autor.

Para o controle de qualidade de dados desenvolveu-se um procedimento composto por 6 etapas, aplicado aos fluxos de CO_2 , LE e H logo após seu cálculo pelo software EddyPro®:

1° Filtro de limites físicos: Os limites físicos possíveis considerados para o sítio experimental estudado foram:

$$-40 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \leq CO_2 \leq 40 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$-50 \text{ W m}^{-2} \leq LE \leq 650 \text{ W m}^{-2}$$

$$-70 \text{ W m}^{-2} \leq H \leq 300 \text{ W m}^{-2}$$

2° Filtro de desvio padrão: Os dados são separados em valores positivos e negativos. Valores de fluxo são removidos com base no desvio padrão da média, para cada grupo. O desvio padrão pode ser ajustado de acordo com a necessidade e a variável que se deseja filtrar.

3° Filtro de coespectro: Os espectros e coespectros dos fluxos são calculados pelo software EddyPro®. Cada fluxo de 30 minutos recebe um flag estatístico (2=ruim, 1=bom, 0=muito bom) que resulta do teste de qualidade do espectro de do coespectro. Valores com flag ruim são removidos.

4° Filtro de distribuição: Os dados são agrupados em horários, totalizando 48 grupos (grupo 1 = 00:00 hora, grupo 2 = 00:30 hora, grupo 3 = 01:00 hora...). É calculado o percentil para cada grupo, sendo removidos os valores menores que o 5° elemento e maiores que o 95° elemento do percentil.

5° Filtro de chuva: Devido à forma geométrica do analisador de gás e do anemôme-

tro sônico, em períodos de precipitação pode ocorrer acúmulo de gotículas nos sensores, afetando a precisão das medidas. Assim, na ocorrência de precipitação e 30 minutos após seu término (para o instrumento secar) os dados de fluxo são eliminados.

6° Filtro de velocidade de fricção (u^*): O valor de $u^*_{critico}$ é calculado de acordo com a metodologia proposta por Papale et al. (2006). Fluxo de CO_2 calculado em condições de velocidade de fricção abaixo do $u^*_{critico}$ encontrado são excluídos.

Este procedimento foi transformado em uma função no software R (R Core Team, 2018) com funções da base e dos seguintes pacotes: Knauer (2018), Xenakis (2016), Grolemond e Wickham (2011), Sefick (2016), Auguie (2017), Garnier (2018) e Wickham (2016).

A maioria dos filtros utilizados são puramente estatísticos, o que implica em cuidados necessários em sua aplicação. Neste sentido, os valores empregados para os limites físicos e para o desvio padrão poderão variar para diferentes ecossistemas e configurações de instalação instrumental, como altura de medição e frequência de coleta de dados.

A fim de definição, neste trabalho, valores negativos do fluxo de CO_2 representam absorção de CO_2 da atmosfera pelo ecossistema e os valores positivos representam emissão do CO_2 do ecossistema para a atmosfera.

O fluxo de CO_2 após o processamento e controle de qualidade dos dados é apresentado na Figura 4.10. As 4 lacunas grandes presentes apenas no manejo rotativo foram ocasionadas por curto circuito no cabo de alimentação do anemômetro sônico. O problema foi solucionado apenas após uma série de testes realizada em todo o sistema de alta frequência no Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Durante estas 4 semanas de testes o sistema ficou desligado, o que representa a lacuna maior na Figura 4.10, do final de julho ao início de setembro.

Na tabela 3.2 podemos observar a porcentagem total de falhas para cada manejo e as falhas devido ao controle de qualidade dos dados e sua respectiva etapa:

Tabela 3.2 – Porcentagem de dados do fluxo de CO_2 removidos em cada etapa do controle de qualidade.

	MR	MC	MD
Dados brutos %	33	1	1
etapas	%	%	%
1° Filtro de limites físicos	1,4	2,5	5
2° Filtro de desvio padrão	1,7	2,5	2,3
3° Filtro de coespectro	6	9	9
4° Filtro de distribuição	6	7	9
5° Filtro de chuva	<1	<1	<1
6° Filtro de velocidade de fricção (u^*)	6	9	11
Total	54	36	31

É importante notarmos que o controle de qualidade de dados rigoroso é fundamental na análise dos fluxos de CO_2 , sendo as porcentagens de falhas encontradas neste trabalho condizentes com as literaturas da área (LONGDOZ; GROSS; GRANIER, 2007; WUTZLER et al., 2018; PAPAIE et al., 2006). Outro ponto importante é o significado das falhas. Falhas são consideradas valores não reais, devido a diferentes fatores, tais como: precipitação, mau contato, insetos nos instrumentos, dentre outros fatores que não são causados por problemas técnicos. A porcentagem de dados removidos na etapa 5 do controle de qualidade (filtro de precipitação) removeu uma pequena quantidade de dados. Isso ocorre devido à rigorosidade das etapas anteriores que certamente já removeram picos dos fluxos que ocorreram devido à precipitação.

4 RESULTADOS

4.0.1 Condições ambientais

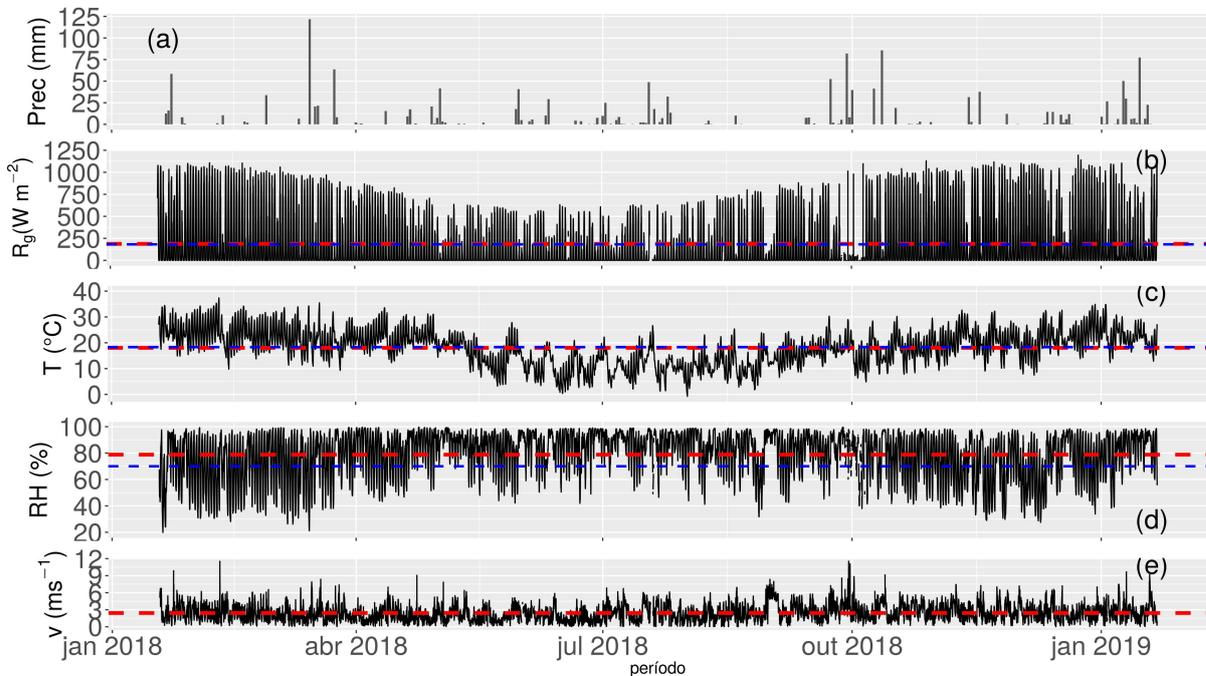
Diferentemente de outras regiões do Brasil, a região Sul possui precipitação bem distribuída ao longo do ano (REBOITA et al., 2010). As frentes frias que passam regularmente pelo Rio Grande do Sul favorecem uma boa distribuição espacial e temporal das chuvas (CERA; FERRAZ, 2015).

Cerca de 40 km distante do sítio experimental, a cidade de Bagé apresenta normal climatológica de precipitação igual a 1513,6 mm anuais, valores estes obtidos de uma estação meteorológica oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A distribuição mensal da precipitação e da temperatura das normais climatológicas e do sítio experimental podem ser observadas na Tabela 4.1. A média diária acumulada da precipitação para o sítio experimental de Aceguá é apresentada na Figura 4.1a). O regime de precipitação no sítio experimental foi influenciado por um período de 3 meses de *La Niña*, de janeiro a março de 2018, e os 3 meses seguintes apresentaram inatividade de qualquer fenômeno climático. O fenômeno *El Niño* foi registrado nos meses de junho de 2018 a janeiro de 2019 (ENSO, 2018). Durante os meses de *La Niña* foi registrada precipitação abaixo da média, contudo, ao final do período de um ano, a média de precipitação registrada no sítio experimental foi a mesma que a normal climatológica anual. Isso se deve pela influência do fenômeno *El Niño* na maior parte do ano.

Tabela 4.1 – Normais climatológicas de precipitação e temperatura para Bagé 1981 - 2010 e médias mensais para o sítio experimental.

Normais climatológicas	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Total
Precipitação (mm)	125,0	130,7	102,6	161,3	150,8	131,7	132,3	106,3	111,1	129,7	118,9	113,2	1513,6
Temperatura (°C)	23,9	23,2	22,2	18,9	15,4	13,0	12,4	14,2	15,1	18,0	20,3	22,6	18,6
Médias mensais para o sítio experimental													
Precipitação (mm)	96,3	51,2	242,2	68,3	117,1	70,6	178,5	173,9	179,2	193,1	84,8	61,8	1517,3
Temperatura (°C)	24,6	23,8	21,5	22,2	16,2	10,3	11,2	11,4	16,7	16,8	21,0	21,6	18,4

Figura 4.1 – Variáveis meteorológicas para o sítio de Aceguá. a) Precipitação diária acumulada - Prec ($\text{mm } d^{-1}$); b) radiação global incidente - R_g (Wm^{-2}); c) temperatura do ar - T ($^{\circ}\text{C}$); d) umidade relativa do ar - RH (%); e) velocidade média do vento - v (ms^{-2}). A linha vermelha pontilhada representa o valor médio encontrado e a linha azul a normal climatológica da cidade de Bagé.

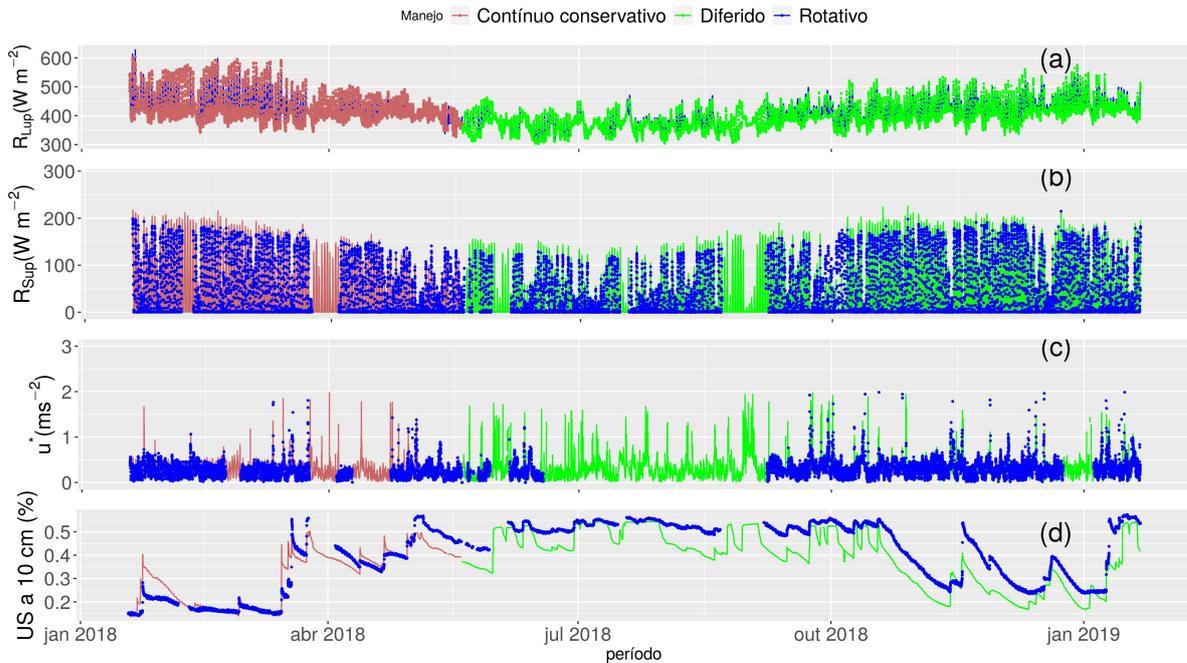


Fonte: Autor.

A radiação de onda curta incidente R_g , mostrada na Figura 4.1b), apresenta forte sazonalidade anual, com valores entre 500 e 600 Wm^{-2} ao meio dia nos meses de junho e julho. Isso representa 50% da radiação de onda curta incidente dos meses mais quentes, onde os valores máximos chegam a ultrapassar os 1195 Wm^{-2} . R_g médio do período de estudo foi de 186,75 Wm^{-2} , cerca de 8 Wm^{-2} a mais que os valores encontrados para os Sítios de Santa Maria, 173,8 Wm^{-2} , e Pedras Altas, 182,1 Wm^{-2} , em estudos anteriores utilizando um período de 2 anos, de 2014 a 2016 (RUBERT, 2017). A temperatura do ar apresenta sazonalidade bem definida variando entre -1 e 37,3 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.1c)), correlacionada à R_g . A média foi de 17,8 $^{\circ}\text{C}$, muito próxima à normal climatológica da cidade mais próxima (Bagé), que foi de 18,3 $^{\circ}\text{C}$. A umidade relativa do ar medida foi abaixo de 40% durante a maior parte dos meses de janeiro a março (Figura 4.1d)). Em janeiro de 2018 foram registrados valores próximos a 20%, considerado estado de alerta (CEPAGRI, 2010). A média de RH foi, em valores absolutos, 8,5 acima da normal climatológica (70%), o que pode ser atribuído ao maior índice pluviométrico durante o ano, causado por influência do fenômeno *El Niño*. A velocidade do vento (Figura 4.1e)), apresenta um valor médio de 2,41 m s^{-2} e chega a valores acima de 11 ms^{-2} , não apresentando sazonalidade definida ao longo do período analisado.

A radiação de onda longa emitida pela superfície, Figura 4.2a), apresenta valores muito similares entre as torres localizadas nas três unidades experimentais avaliadas em pares. Para o *Grupo 1* (MR - MC) a média da R_{Lup} é de $427,2 \text{ Wm}^{-2}$ para a torre localizada no tratamento MC e $422,1 \text{ Wm}^{-2}$ para a localizada em MR. O *Grupo 2* (MR - MD) apresenta média de $403,2 \text{ Wm}^{-2}$ para MR e $391,5 \text{ Wm}^{-2}$ para MD, ao final dos 244 dias. Isso representa uma diferença de aproximadamente 3% na R_{Lup} para o *Grupo 1* e menos de 2% para o *Grupo 2*. Na Figura 4.2b) observa-se a radiação de onda curta refletida pela superfície. R_{Sup} é influenciada diretamente pela vegetação localizada imediatamente abaixo do sensor. De janeiro a 19 de março, a R_{Sup} média para a torre em MC equivaliu a $55,42 \text{ Wm}^{-2}$, com valores máximos de 217 Wm^{-2} . No mesmo período, a R_{Sup} máxima na torre localizada em MR foi de 199 Wm^{-2} , com valor médio de $48,8 \text{ Wm}^{-2}$. Essa diferença de quase quase 10% se deve ao forte déficit hídrico que ocorreu neste período. Onde a área imediatamente abaixo do sensor da torre localizada no tratamento MC perdeu maior cobertura do solo devido ao pastejo constante dos animais, o que aumenta a refletividade da superfície à radiação de onda curta. Na metade final de março ocorreram precipitações significativas, Figura 4.1a), o que possibilitou o crescimento da pastagem, período no qual a R_{Sup} é similar para ambas as torres. A R_{Sup} para o *Grupo 2* é ligeiramente maior em MD, cerca de 5%, com valor médio de 38,5 e máximo de $214,6 \text{ Wm}^{-2}$ para MD e 36,5 e $225,7 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente, para MR. A cobertura do solo na área imediatamente abaixo do sensor na torre localizada no tratamento MR foi maior que a do MD, o que diminuiu a R_{Sup} avaliada nessa torre.

Figura 4.2 – Variáveis meteorológicas para as três torres localizadas em unidades experimentais submetidas aos diferentes tratamentos de manejo pastoril (Rotativo, Contínuo Conservativo, Diferido) do sítio experimental de Aceguá. a) Radiação de onda longa emitida pela superfície - $R_{L\uparrow}$ ou R_{Lup} (Wm^{-2}); b) radiação de onda curta refletida pela superfície - $R_{S\uparrow}$ ou R_{Sup} (Wm^{-2}); c) velocidade de fricção - u^* (ms^{-1}); d) umidade do solo a 10 cm - US (%)



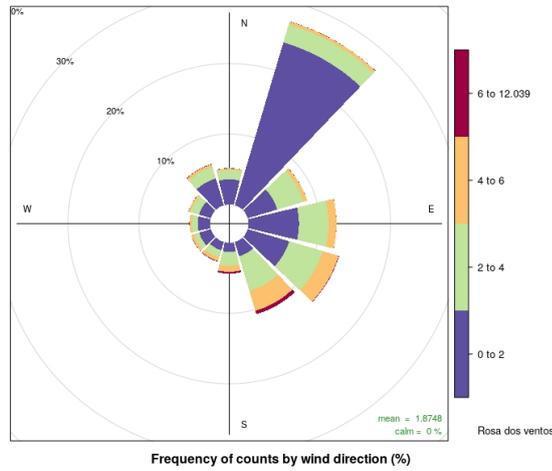
Fonte: Autor.

A velocidade de fricção é semelhante nas três torres, com valores médios de 0,285, 0,258 e 0,264 para as torres localizadas em MR, MC, MD, respectivamente. A umidade do solo a 10 cm, Figura 4.2d), apresenta valor médio de 0,306% para MR e 0,302% para MC (*Grupo 1*), com períodos abaixo de 0,2%, durante a seca. Após períodos de precipitação, a resposta da US foi mais rápida para a torre localizada em MC, contudo, o solo na área imediatamente sob os sensores da torre secou antes que na torre localizada em MR, o que pode ter sido resultado da menor cobertura vegetal sob os sensores da torre. No *Grupo 2* se observa que a US é maior em todos os instantes na torre localizada em MR, no qual apresenta média de 0,44%, em comparação à 0,391% na torre em MD. Essa diferença pode ocorrer devido à diferentes solos ou cobertura vegetal. A resposta da US à precipitação foi mais rápida na torre localizada em MD.

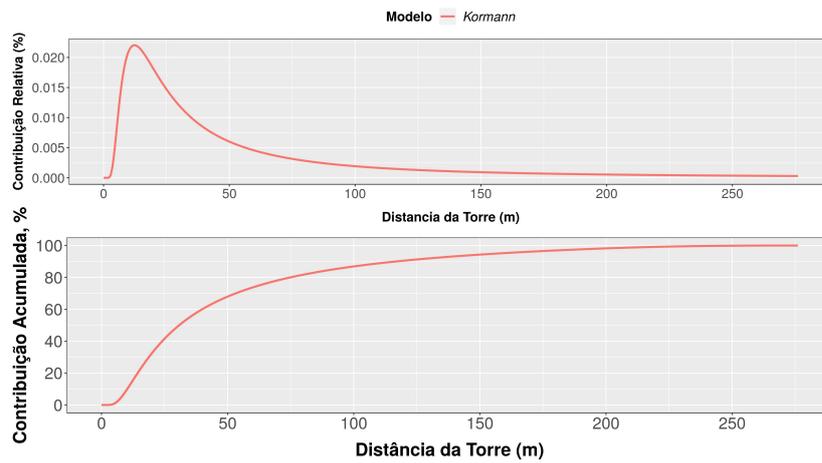
4.0.1.1 Footprint do sítio

A Figura 4.3 mostra a rosa dos ventos em MR, as contribuições cumulativa e relativa e o footprint com os piquetes A3 e A4 (Figura 3.2) em verde e a Torre no ponto central. A rosa dos ventos indica que a direção predominante do vento é de sudeste ($1,87 \text{ m s}^{-1}$), com 26% do vento menor que 2 m s^{-1} de nordeste. A contribuição relativa, que indica a distância da qual a maior porcentagem dos fluxos é proveniente, em MR é de 30 m. A Contribuição acumulada indica a que distância da torre corresponde a porcentagem dos fluxos medidos. Por exemplo, se considerarmos a contribuição acumulada de 90%, a distância máxima a que essa porcentagem de fluxo corresponde é de 100 m. A distância da Torre instalada em MR até os limites Norte, Sul, Leste e Oeste é de aproximadamente 100 m, como representado pela área hachurada em verde, na Figura 4.3c. Portanto, não há necessidade de exclusão de dados devido à contribuições de fora deste manejo.

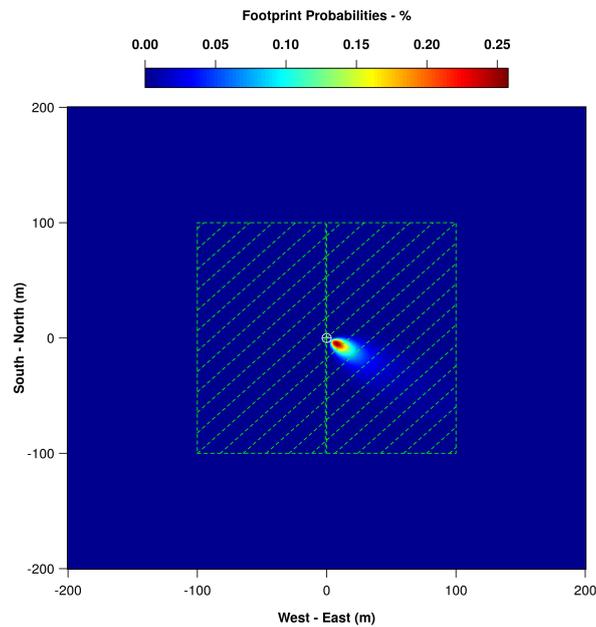
Figura 4.3 – Rosa dos ventos, contribuição relativa e cumulativa e footprint para a torre localizada em MR.



(a) Rosa dos ventos em MR.



(b) Contribuição relativa e acumulada em MR.



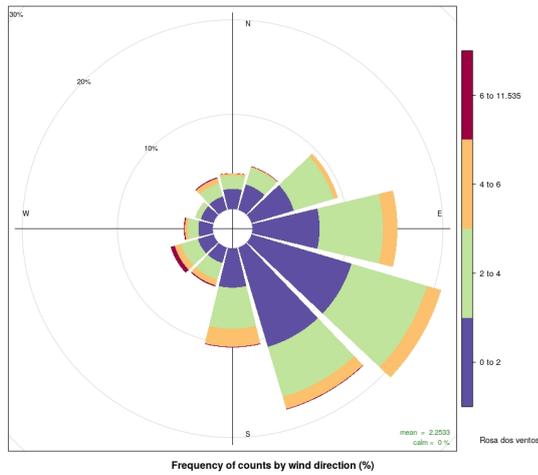
(c) Pluma do footprint em MR.

Fonte: Autor.

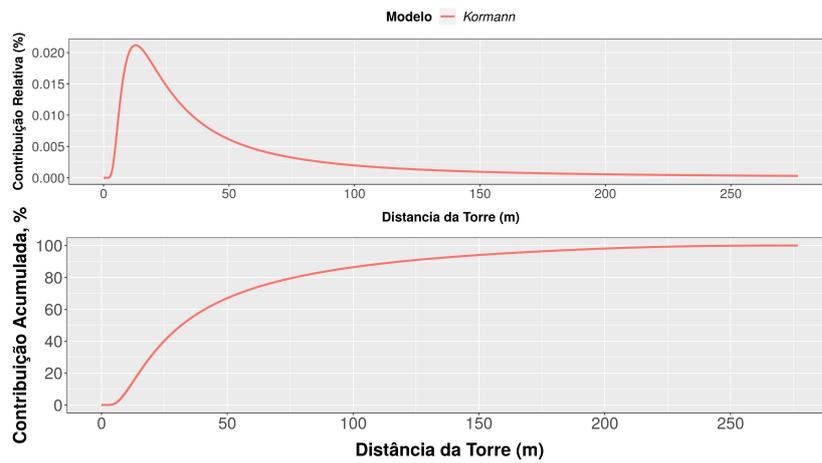
Para MC, a rosa dos ventos (Figura 4.4a) mostrou direção predominante do vento de sudeste, com velocidade média do vento igual a $2,25 \text{ m s}^{-1}$. A contribuição relativa indicou que a maior porcentagem dos fluxos foi proveniente de aproximadamente 30 m da torre, e a contribuição acumulada de 90% dos fluxos, Figura 4.4b, mostrou que a distância máxima a que essa porcentagem de fluxo corresponde é de 100 m . Neste manejo a distância da Torre até a cerca do lado sudeste é de 95 m , não havendo necessidade de exclusão de dados com contribuição de fora do manejo, como é mostrado pela pluma do footprint, Figura 4.4c.

Em MD, a velocidade média do vento foi maior que nos outros manejos, $2,47 \text{ m s}^{-1}$ e a direção predominante do vento foi de sudeste, Figura 4.5a. Tanto a contribuição relativa (30 m) quanto a contribuição acumulada (90% dos fluxos de até 100 m) foram similares a MR e MC. A pluma do footprint, Figura 4.5c, mostrou que não há contribuição proveniente de outro manejo o que indicou que não houve necessidade de exclusão de dados por essa razão.

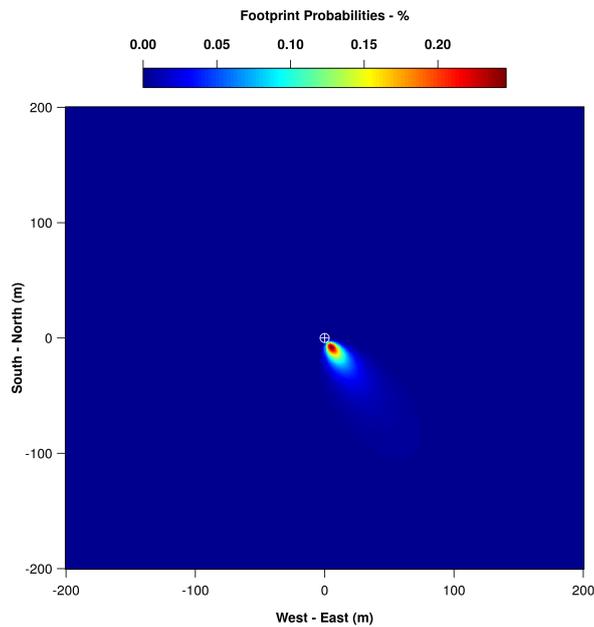
Figura 4.4 – Rosa dos ventos, contribuição relativa e cumulativa e footprint para a torre localizada em MC.



(a) Rosa dos ventos em MC.



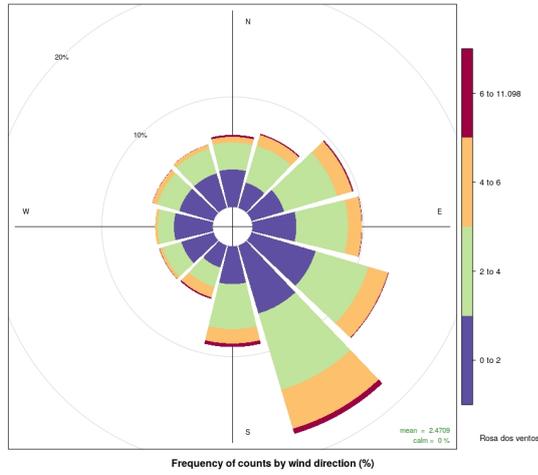
(b) Contribuição relativa e acumulada em MC.



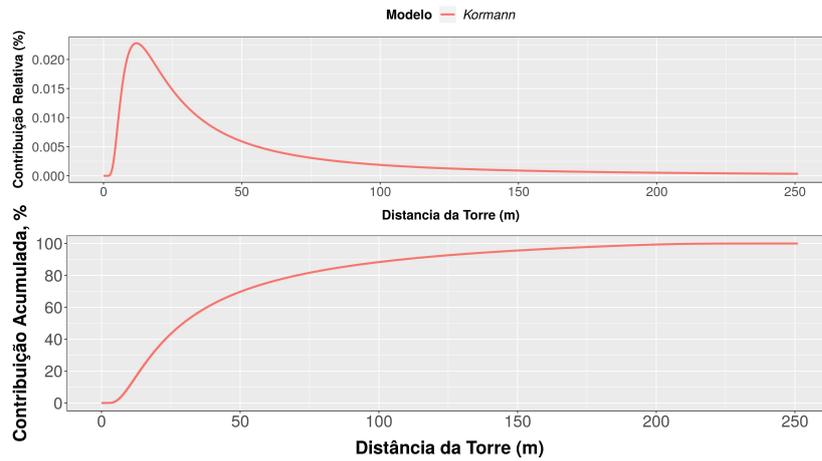
(c) Pluma do footprint em MC.

Fonte: Autor.

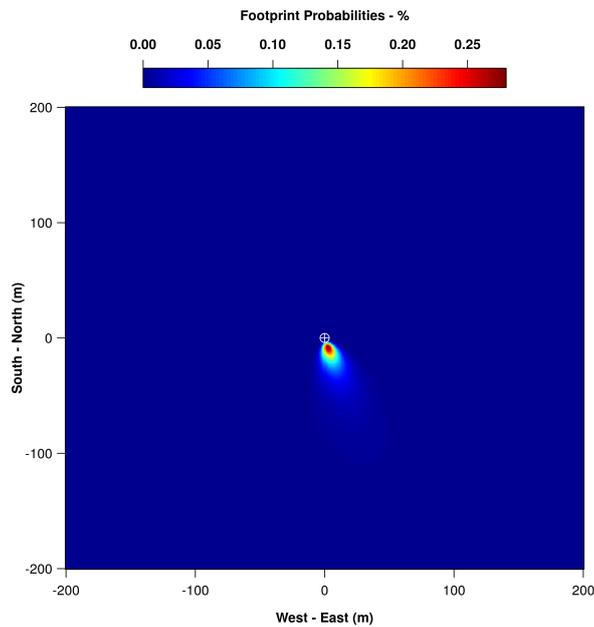
Figura 4.5 – Rosa dos ventos, contribuição relativa e cumulativa e footprint para a torre localizada em MD.



(a) Rosa dos ventos em MD.



(b) Contribuição relativa e acumulada em MD.



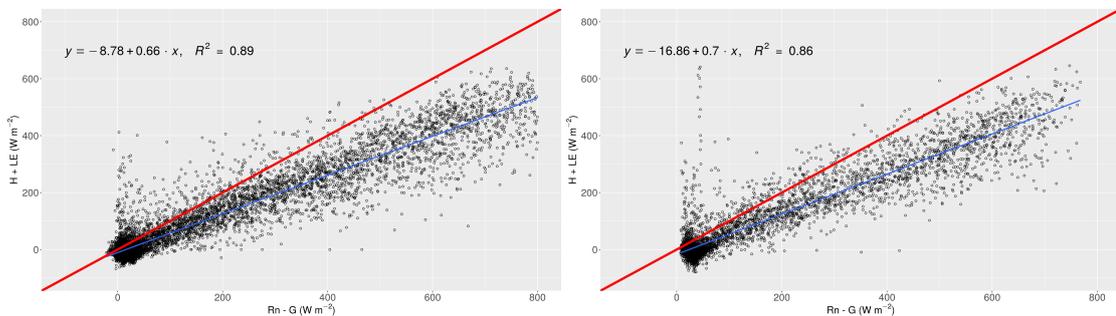
(c) Pluma do footprint em MD.

Fonte: Autor.

4.0.2 Fechamento do balanço de energia

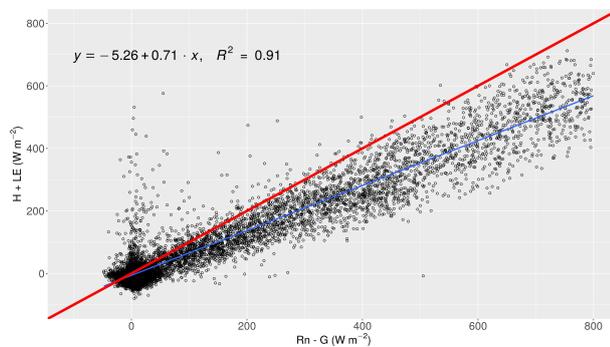
A relação entre a energia disponível ($R_n - G$) e a soma dos fluxos turbulentos ($H + LE$) é frequentemente utilizada como um indicador da precisão dos fluxos de energia (H e LE) estimados pelo método da Covariância dos Vórtices Turbulentos (BURBA; ANDERSON, 2010). A Figura 4.6 mostra esta relação para as áreas MR, MC e MD. O coeficiente angular encontrado na regressão linear foi de 0,66 para a área em MR, 0,70 em MC e 0,71 em MD, o que representa uma subestimativa de 34%, 30% e 29%, respectivamente, da energia disponível pelos fluxos turbulentos. Para a determinação do fechamento do balanço de energia foram utilizados todos os dados disponíveis em cada torre, sem preenchimento de dados. O não fechamento do balanço de energia é esperado. Aubinet et al. (1999) e Wilson et al. (2002) mostram um não fechamento do balanço de energia em torno de 10-30%, resultado encontrado pela maioria dos autores, que está relacionado à subestimação dos fluxos de energia superficiais medidos pela técnica. Essa subestimação é causada pela heterogeneidade do terreno, o que causa a não contabilização de todas as trocas e processos envolvidos no ecossistema (AUBINET et al., 1999).

Figura 4.6 – Diagrama da dispersão de energia disponível versus fluxos turbulentos para todos os dados disponíveis em cada Torre. A linha azul representa o ajuste linear. A linha vermelha representa 1:1.



(a) Fechamento para a área em MR.

(b) Fechamento para a área em MC.



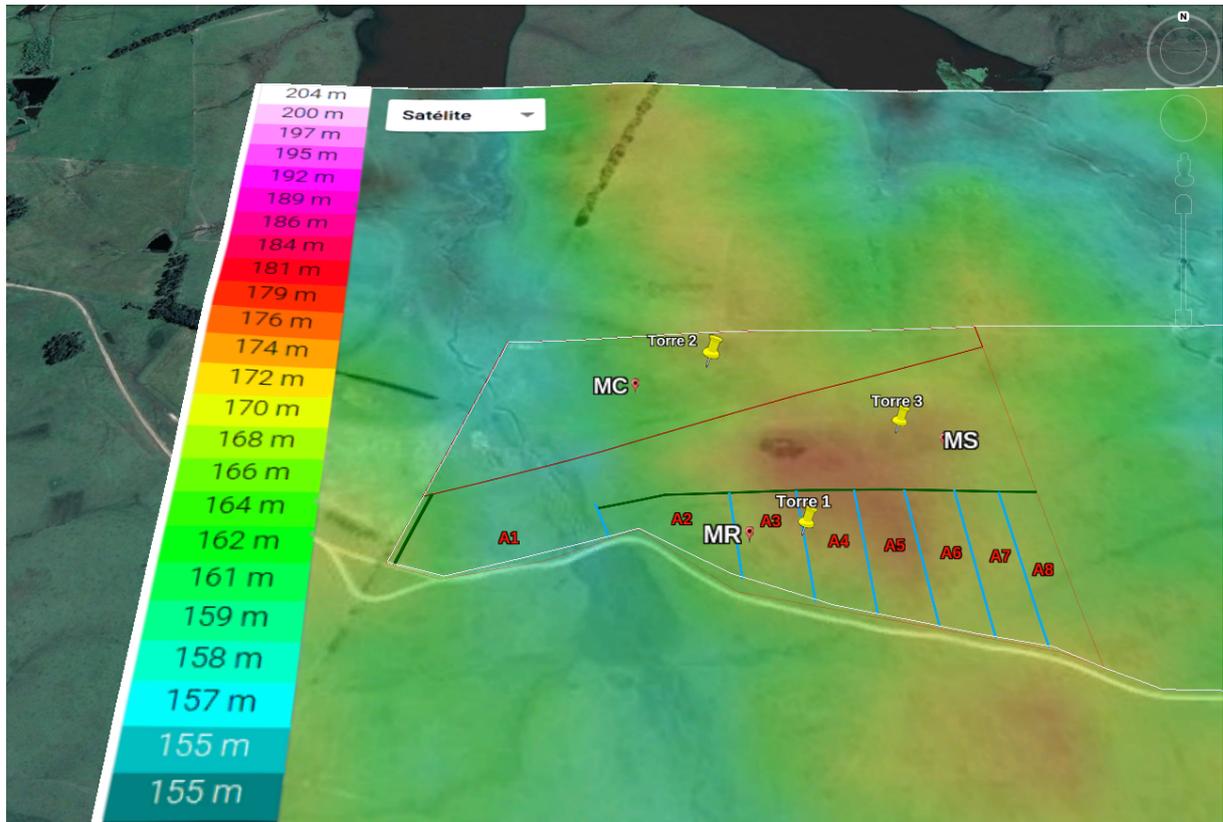
(c) Fechamento para a área em MD.

Fonte: Autor.

O relevo e a posição das torres pode ser observado na Figura 4.7. A torre instalada na unidade experimental submetida ao tratamento MR possui maior declividade em relação

às outras, o que explica as diferenças no fechamento do balanço de energia. As outras duas torres, apesar de estarem instaladas em altitudes diferentes, não estão em terreno com tanta declividade.

Figura 4.7 – Composição do relevo com a localização das Torres no sítio experimental de Aceguá.



Fonte: Autor.

Rubert (2017) determinou o fechamento do balanço de energia para dois sítios experimentais, afastados cerca de 200 km, ambos em campos nativos do bioma Pampa, e encontrou uma subestimativa de 25% para o sítio de Santa Maria e 28% para o sítio de Pedras Altas. Esses resultados são próximos aos encontrados neste trabalho.

4.0.3 Dinâmica dos fluxos superficiais

4.0.3.1 Componentes do balanço de energia

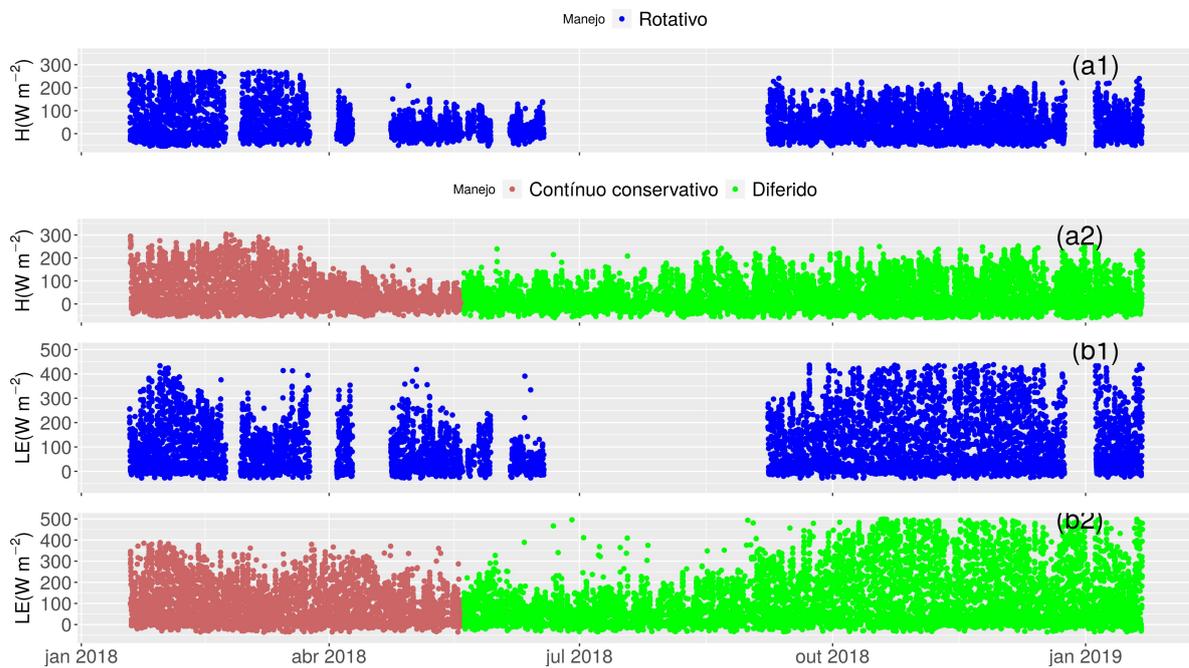
As componentes do balanço de energia, divididos em fluxos turbulentos ($H + LE$) e energia disponível ($R_N - G$), são assim denominados devido à natureza de sua obtenção.

Os fluxos de calor sensível e latente são obtidos através da aplicação da Técnica EC nas variáveis de alta frequência: temperatura sônica, concentração de água na atmosfera, velocidade e direção do vento. O saldo de radiação e o fluxo de calor no solo são obtidos através de medidas diretas.

Os fluxos turbulentos para as três áreas analisadas são mostrados na Figura 4.8. Na Figura 4.8a1) para o *Grupo 1* se observa que para a área em MR o valor máximo de H chegou a $271,26 \text{ Wm}^{-2}$, com valor médio de $45,96 \text{ Wm}^{-2}$, antes do final de março, enquanto que em MC, apesar do máximo ter chegado a $303,78 \text{ Wm}^{-2}$, o valor médio foi menor, 44 Wm^{-2} . O período de janeiro a março de 2018 apresentou altas temperaturas e, em combinação com o déficit hídrico, ocasionou os menores valores de LE e os maiores valores de H de toda a série temporal. LE, Figuras 4.8b1) e b2), apresentou valores próximos a 450 Wm^{-2} no final de janeiro, na área em MR. Na área em MC LE não ultrapassou 400 Wm^{-2} . Essa diferença de amplitude nos valores de LE pode ter sido ocasionada pela maior cobertura de vegetação na superfície do solo na área do footprint dessa torre. No mês de janeiro a seca ainda não era tão intensa, o que fez com que a vegetação submetida ao tratamento MR, que apresentava maior cobertura do solo, ainda pudesse utilizar energia para evaporar água. Com o aumento de déficit hídrico, os valores de LE diminuem e os de H aumentam, o que implica em menor quantidade de água evaporada e aumento da temperatura do ar.

Analisando o *Grupo 2* percebe-se comportamento dos fluxos turbulentos mais sazonal, principalmente devido ao maior período de estudo. Nos meses de inverno H apresentou temperatura abaixo de 200 Wm^{-2} em ambas as áreas em MR e MD. No final de setembro, com o aumento da temperatura e da radiação global, H e LE aumentam. De 20 de setembro até o final do período, a área em MR apresentou máximo de LE igual a $224,65 \text{ Wm}^{-2}$ e médio de $27,5 \text{ Wm}^{-2}$, enquanto que a área em MD mostrou um máximo de $250,1 \text{ Wm}^{-2}$ e médio de $28,63 \text{ Wm}^{-2}$. Essa diferença de quase 4 % representa maior quantidade de energia utilizada para mudar o estado da água no footprint da torre em MD. H apresentou máximo de $250,4 \text{ Wm}^{-2}$ e média de $28,6 \text{ Wm}^{-2}$ para a área em MD enquanto que em MR o máximo foi de $224,6 \text{ Wm}^{-2}$ e médio de $27,5 \text{ Wm}^{-2}$, de 20 de setembro até o final do período. Os valores máximos e médios de LE e H foram maiores para em MD.

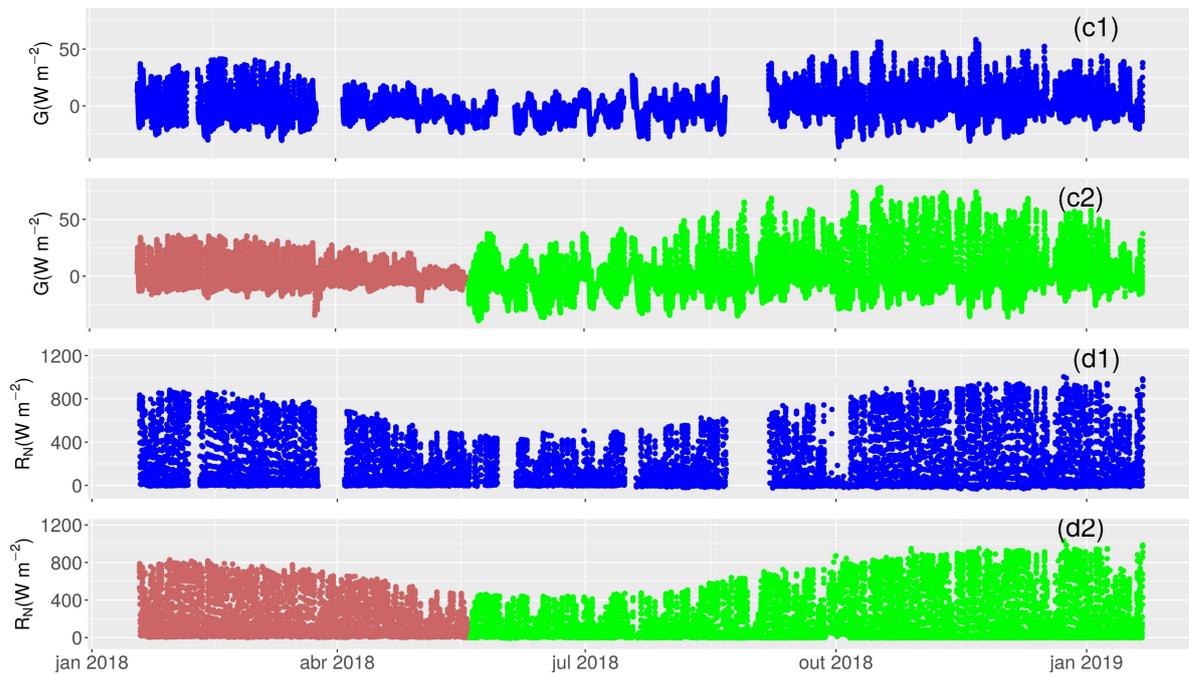
Figura 4.8 – Fluxos turbulentos do sítio experimental. a1), a2) fluxo de calor sensível - H (Wm^{-2}); b1), b2) fluxo de calor latente - LE (Wm^{-2}).



Fonte: Autor.

A energia disponível é mostrada na Figura 4.9. Para o *Grupo 1* G apresentou valor médio de $-2,61 Wm^{-2}$ para a área em MR e $0,19 Wm^{-2}$ em MC. Essa diferença pode ter sido ocasionada pela cobertura de vegetação no ser solo maior no footprint dessa unidade experimental submetida ao tratamento MR, o que fez com que G tenha sido menor nesta área. Observa-se que os valores mínimos de G são maiores na área em MR, o que também pode ter sido causado pela maior cobertura do solo. Para o *Grupo 2*, G apresentou variação maior na área em MD, com máximo de $78,04 Wm^{-2}$ e média de $0,587 Wm^{-2}$, enquanto que na área em MR o máximo foi de $58,42 Wm^{-2}$ e o valor médio de $-1,14 Wm^{-2}$. O valor médio de G foi menor na área em MR, o que novamente pode ter sido causado pela maior cobertura de vegetação do solo nessa área. R_N possui variação sazonal bem definida e as particularidades em cada manejo dependem apenas da radiação de onda curta refletida pela superfície e de onda longa emitida pela superfície, já discutidos na Figura 4.2.

Figura 4.9 – Energia disponível para o sítio experimental. c1), c2) fluxo de calor no solo - G ($W m^{-2}$); d1), d2) saldo de radiação líquida ($W m^{-2}$).



Fonte: Autor.

4.0.3.2 Fluxos de CO_2

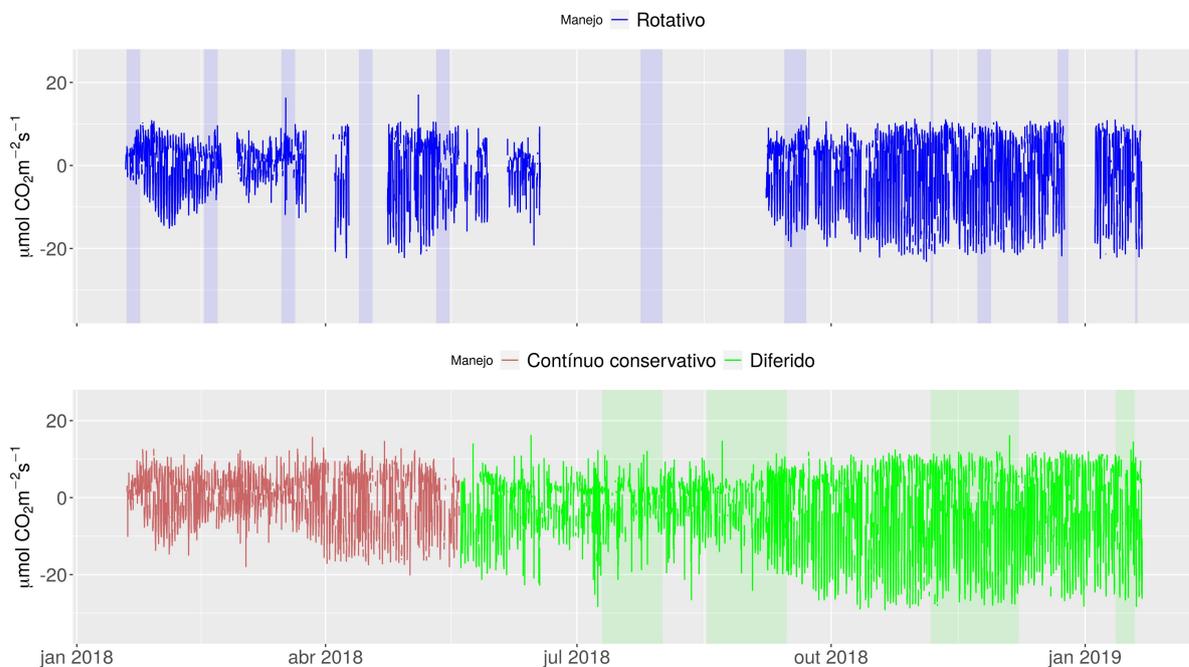
O fluxo de CO_2 para o *Grupo 1*, de janeiro a maio de 2018, mostra 2 padrões. De janeiro a 14 de fevereiro a área localizada na unidade experimental submetida ao tratamento MR apresentou máximo de $10,92 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ e mínimo de $-15,1 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$, enquanto que a área em MC apresentou máximo de $12,8 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ e mínimo de $-14,94 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$, extremos muito similares para ambas as áreas. De 14 de fevereiro até o final do mês, com o aumento do déficit hídrico, iniciou-se outro padrão no fluxo de CO_2 . O valor máximo para a área em MR foi de $9,67 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ e de $11,06 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ em MC. O valor mínimo chegou a $-9,16 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ no MR e $-8,01 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ no MC. Isso mostra que com ausência de precipitação o fluxo de CO_2 diminuiu em ambas as áreas, porém, em taxas diferentes.

Durante o mês de março ocorreu pouca precipitação, o que implica em fluxos similares à segunda metade de fevereiro. Ao final do período com déficit hídrico, metade final de março, os fluxos absolutos de CO_2 aumentaram novamente, porém, a emissão foi maior na área do footprint da torre em MC e a absorção foi maior em MR.

O *Grupo 2* de comparações pareadas, logo no começo da análise, mostrou fluxo de CO_2 com amplitude maior na área em MD, onde variou de -20 a $12 \mu mol CO_2 m^{-2}$

s^{-1} . Para o mesmo período, a área em MR não ultrapassou em seu máximo $10 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ e em seu mínimo $16 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$. Nesse período, LE médio foi maior na área em MD, Figura 4.8, o que indica maior quantidade de energia utilizada para evaporar água e implica em crescimento das plantas maior na área do footprint da torre localizada na unidade experimental submetida a MD. Isso pode explicar a amplitude do fluxo de CO_2 maior na área localizada neste manejo.

Figura 4.10 – Fluxo de CO_2 para as áreas de footprint de três torres localizadas em unidades experimentais submetidas a diferentes tipos de manejo pastoril (Rotativo, Contínuo Conservativo, Diferido) do sítio experimental. As faixas azuis representam o período com gado dentro da região do footprint da unidade experimental submetida ao tratamento MR. As faixas verdes representam período com gado dentro do footprint da unidade experimental submetida ao tratamento MD.



Fonte: Autor.

As faixas azuis na Figura 4.10 representam o período em que o gado estava dentro da região de footprint da torre, ou seja, a influência do gado pode afetar diretamente os fluxos de CO_2 medidos. Quando o piquete está vazio e a pastagem crescendo, o fluxo de CO_2 das plantas deveria ser em sua maioria negativo. Com a entrada do gado e o início do pastoreio da vegetação, a planta voltaria a crescer e seu fluxo seria diferente. Apesar de aumento do fluxo na maioria das vezes em que o gado entra na região de footprint da área em MR, é difícil afirmar o quanto ele influencia nos fluxos com os dados que dispomos. Além disso, no tratamento MC o gado pasta livremente e influencia as medidas sempre que pasta próximo à torre. Portanto, é difícil quantificar a influência da entrada do gado na região de footprint analisando apenas os fluxos médios. Esta análise será feita mais

adiante, Figuras 4.14 e 4.15.

Na Figura 4.10, observa-se que as faixas verdes são maiores que as azuis, o que indica que o gado passou mais tempo, cerca de 1 mês, dentro da região do footprint da torre localizada na unidade experimental sob MD. Novamente, não é possível observar influência da presença do gado nos fluxos médios.

Comparando os fluxos do *Grupo 2*, observa-se que no inverno os fluxos apresentaram amplitude menor que no verão, diminuindo bastante a absorção de CO_2 devido à diminuição dos valores de R_N e conseqüente diminuição da fotossíntese. No verão sua amplitude aumenta e um padrão de absorção fica claro entre os footprints das duas torres. Na área em MD a absorção atingiu quase $-30 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ com valor máximo de $12,6 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$, enquanto que em MR apresentou mínimo de $-22 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ e máximo de $9,8 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$. Os valores máximos médios são quase iguais, mas a absorção detectada pela torre em MD foi cerca de 30% maior que em MR.

4.0.3.3 Ciclo médio de CO_2 bissetmanal

O ciclo médio de CO_2 foi calculado com janela de 14 dias para os dois *Grupos*. A Tabela 4.2 mostra a temperatura média, a precipitação acumulada e os fluxos médios para cada área avaliada em cada período (janela) bissetmanal. São contabilizados na média dos fluxos apenas os valores que correspondem a períodos com dados nos dois manejos.

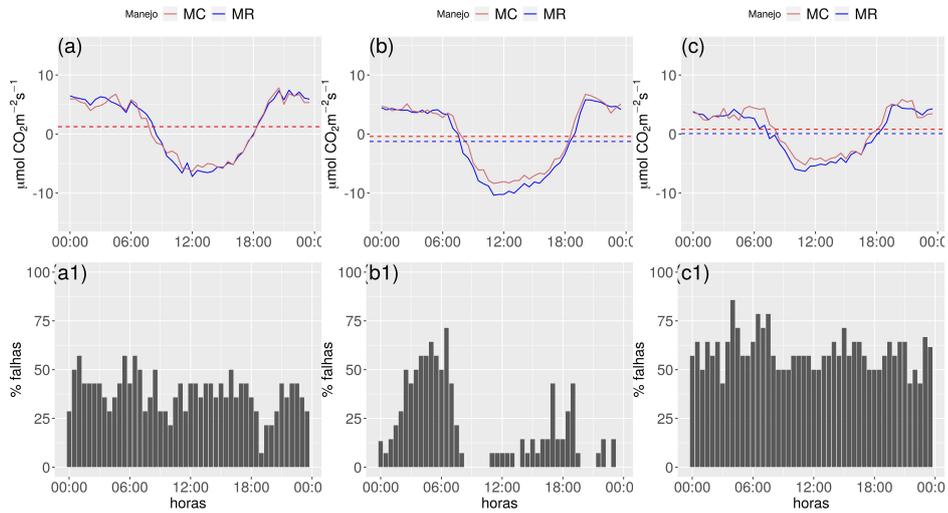
Tabela 4.2 – Período de análise e valores médios de temperatura (Temp °C), precipitação acumulada (Prec mm), fluxo de CO_2 para cada Grupo.

Datas	Fig	Temp (°C)	Prec (mm)	CO2 MR	CO2 MD	CO2 MC
Grupo 1	Figura 4.9					
18/01 - 01/02	a)	24,4	96,0	1,24		1,24
01/02 - 15/02	b)	24,0	11,0	-1,25		-0,4
15/02 - 28/02	c)	23,5	39,0	0,07		0,8
28/02 - 14/03	d)	22,6	6,5	0,35		1,21
14/03 - 28/03	e)	20,0	235,0	1,74		2,03
28/03 - 11/04	f)	22,6	3,5	-0,29		-0,74
11/04 - 25/04	g)	21,5	43,0	-2,29		-1,88
25/04 - 09/05	h)	20,9	77,0	-0,36		0,06
09/05 - 19/05	i)	16,0	2,7	1,08		-1,45
Grupo 2	Figura 4.10					
19/05 - 02/06	a)	13,8	63,7	0,15	-0,34	
02/06 - 16/06	b)	10,3	49,0	-0,24	-0,39	
16/06 - 30/06	c)	9,7	16,4	-1,73	-6,87	
30/06 - 14/07	d)	10,7	50,4	NaN	NaN	
14/07 - 28/07	e)	12,4	128,0	NaN	NaN	
28/07 - 11/08	f)	10,2	5,24	NaN	NaN	
11/08 - 25/08	g)	11,7	51,6	NaN	NaN	
25/08 - 08/09	h)	13,3	129,2	-3,69	-4,67	
08/09 - 22/09	i)	16,3	16,6	-0,45	-1,37	
22/09 - 06/10	j)	17,2	190,2	-1,29	-3,51	
06/10 - 20/10	k)	17,2	146,1	-1,89	-3,87	
20/10 - 03/11	l)	17,6	7,3	-1,82	-3,32	
03/11 - 17/11	m)	21,8	34,6	-1,93	-3,48	
17/11 - 01/12	n)	20,7	50,2	-2,29	-2,86	
01/12 - 15/12	o)	19,6	30,4	-2,51	-3,26	
15/12 - 29/12	p)	22,8	31,4	-0,21	-0,09	
29/12 - 12/01/19	q)	23,5	122,0	-0,97	-1,33	
12/01/19 - 18/01/19	r)	21,3	50,0	-1,91	-2,61	

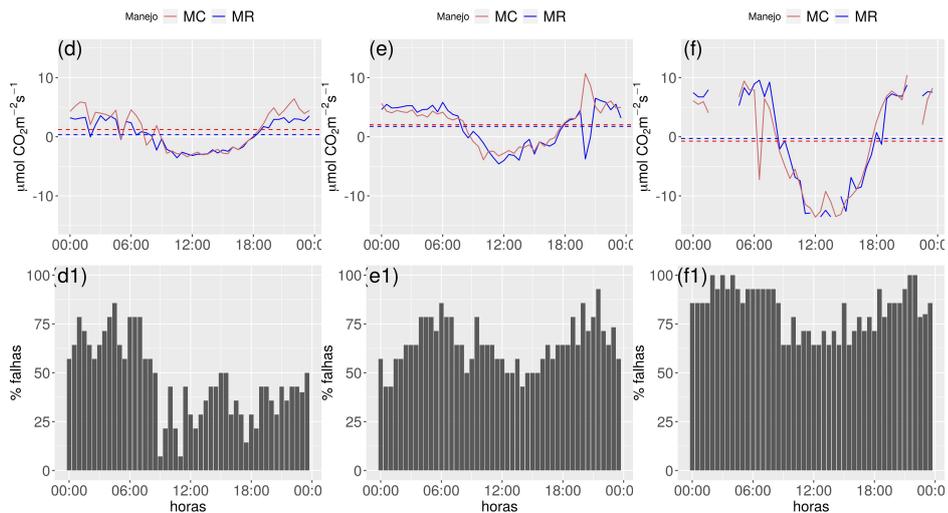
A Figura 4.11 mostra o ciclo médio diário de CO_2 para o *Grupo 1*. Abaixo do ciclo médio de CO_2 de cada janela, é apresentado a porcentagem de falhas para cada horário dos cálculos da média. Cada letra representa um período, conforme mostrado na Tabela 4.2. A janela a) representa período sem muita influência do déficit hídrico, com valor médio dos fluxos de $1,24 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ para as áreas nos dois manejos. O pico de absorção na área em MR foi de $-7,18 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ e de $-6,29 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ em MC, ambos ao meio dia. O pico de emissão ocorreu às 20 h 30 min com valor de $7,32 \mu mol$

$CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para a área em MR e $7,82 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em MC. Em comparação com a janela b), onde o déficit hídrico era intenso, percebe-se que a área em MR revelou maior absorção de CO_2 , $-10,3 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ das 11 h até as 13 h enquanto a área em MC indicou absorção de $-8,1 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ neste mesmo horário. Em condições de precipitação reduzida a área em MR indicou maior absorção de CO_2 da atmosfera, o que pode ter resultado da maior cobertura do solo, o que diminui a perda de água. A janela c) representa o período mais seco de toda a análise, com precipitação cerca de 70% abaixo da normal climatológica. Comparando as janelas b) e c), percebe-se que o pico de absorção dos fluxos foi menor na área em MR apenas até o meio dia, o que indica que a seca foi tão intensa que a vegetação no footprint da torre em MR, no pico de radiação, já não realizava fotossíntese com a eficiência esperada devido à falta de água. Mesmo assim, o valor médio diário dos fluxos foi menor em MR, $(0,07 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ em comparação à área em MC $(0,8 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$. A janela d) mostra a menor amplitude absoluta dos fluxos $(10 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$, com picos de absorção de $5 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e pico de emissão de $-5 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ resultante do não crescimento da vegetação devido à seca nesse período. As janelas e), f) e g) mostram que a amplitude dos fluxos aumenta gradativamente com a ocorrência de precipitação, também mostrados na Figura 4.10. Estes períodos também apresentam maior número de falhas devido à interferência que a precipitação causou no anemômetro sônico e no analisador de gás. Com o crescimento da vegetação, pode se observar na janela f) que a amplitude absoluta dos fluxos chega a $17 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, uma diferença de 63% em relação à janela d). O pico de absorção foi de $-14,4 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o footprint da torre em MR e $-13,2 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em MC, o que representa as maiores absorções do *Grupo 1*, sendo o período com maior quantidade de dados. O fluxo médio de CO_2 foi menor na área em MR em 8 das 9 janelas bissemanais. Na janela i), onde o fluxo médio foi menor para o footprint da torre em MC, a quantidade de dias foi menor que 14, o que pode ser a causa do fluxo ser diferente das outras janelas.

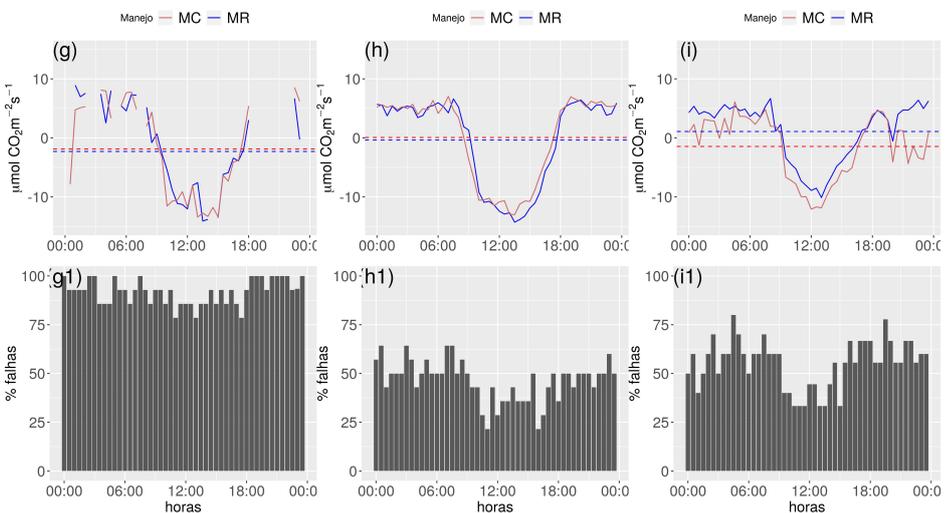
Figura 4.11 – Ciclo médio diário do fluxo de CO_2 para nove períodos de duas semanas de avaliação (a-i) para o *Grupo 1*. A linha pontilhada azul representa a média dos fluxos para MR e a vermelha para MC.



(a) Grupo 1 a); b); c).



(b) Grupo 1 d); e); f).

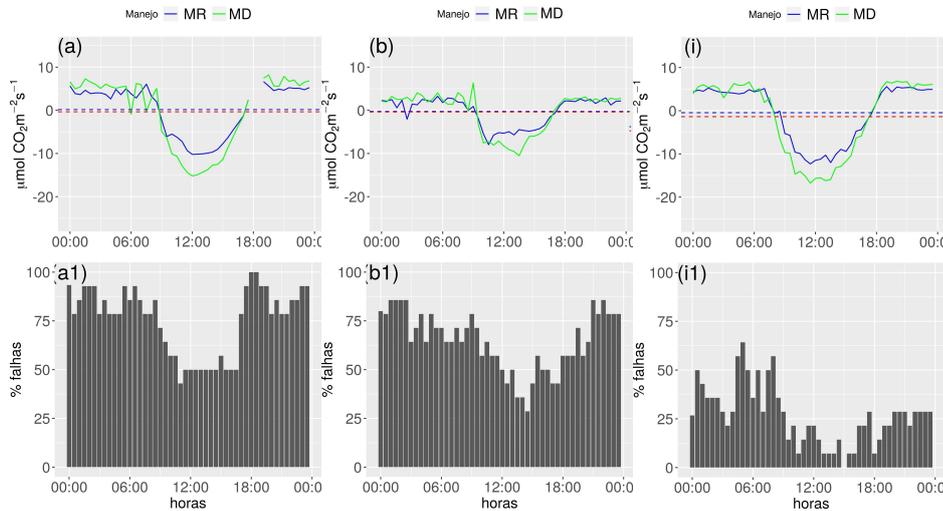


(c) Grupo 1 g); h); i).

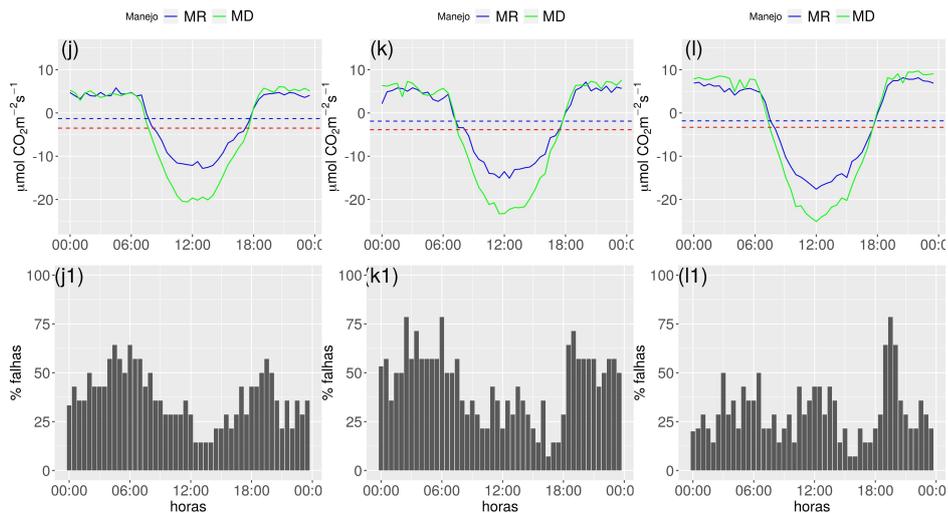
Fonte: Autor.

A Figura 4.12 mostra o ciclo médio diário de CO_2 para a primeira metade do Grupo 2. As janelas correspondentes aos períodos c), d), e), f), g) e h) foram removidas devido à ausência ou quantidade insuficiente de dados (<90% de dados). As janelas a) e b) apresentam grande quantidade de falhas devido à precipitação. Apesar do fluxo ser mais negativo na área em MD durante o dia, o fluxo médio diário nas duas áreas foi muito similar, o que mostra que durante o período noturno ocorreu maior respiração na área em MD. O pico de absorção de CO_2 na área em MD chegou a $-15 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$, período no qual a área em MR registrou $-10 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$. Na janela i) o gado esteve no potreiro dentro do footprint em MD nos 6 dias iniciais. O pico de absorção de CO_2 chegou a $-15,8 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ na área em MD, com valor médio de fluxo similar nos dois manejos. Nas janelas j) e k) o gado não esteve no footprint da torre em MD. Nesta situação, as plantas crescem sem o pastejo do gado, ocorrendo a maior absorção de CO_2 durante o período diurno e maior emissão no período noturno. Isso pode ser observado nas janelas j), k) e l), onde o pico de absorção passa de $-20 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ (janela j)) a $-25 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ (janela l)), representando o crescimento das plantas e aumento da absorção de CO_2 . No período noturno, o aumento da emissão reforça a hipótese do crescimento das plantas, ou seja, aumento da respiração no período em que não há gado no entorno da torre em MD. O pico de emissão que era de $5 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ na janela j) chegou a $10 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ na janela l).

Figura 4.12 – Ciclo médio diário para seis períodos de duas semanas de avaliação (a, b, i, j-l) para a segunda metade do *Grupo 2*. A linha pontilhada azul representa a média dos fluxos para MR e a vermelha para MC.



(a) Grupo 2 a); b); i).



(b) Grupo 2 j); k); l).

Fonte: Autor.

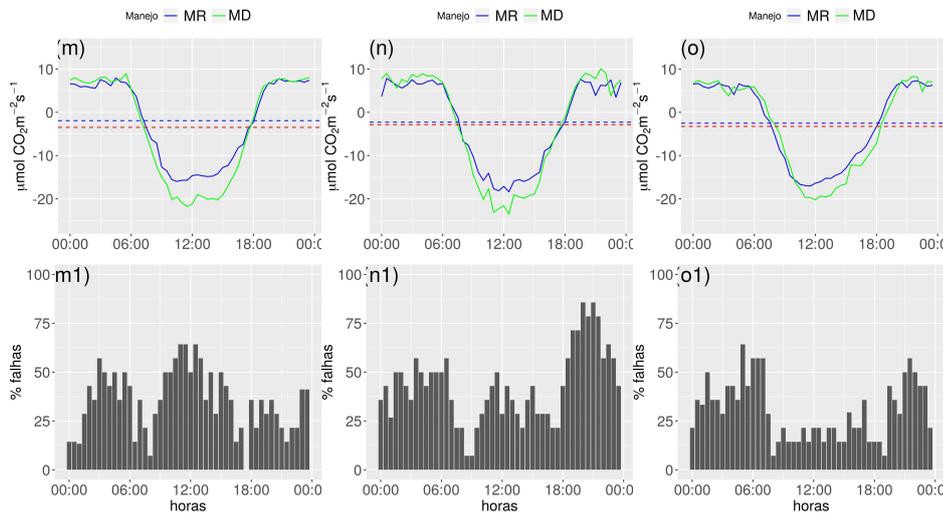
O ciclo médio diário bissemanal de CO_2 para a segunda metade do *Grupo 2* é mostrado na Figura 4.13. As janelas m) e n) correspondem a períodos em que o gado permaneceu os 14 dias dentro do footprint da torre no tratamento MD. Na janela m) é observado pico de absorção de $-21,0 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ na área em MD e $-15,4 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ em MR, uma diferença de quase $6 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$. O período noturno possui valores similares de fluxo ($\sim 8 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$) em ambas as áreas. Na janela n) o pico de absorção chega a $-22,4 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ para a área em MD e $-18 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ em MR, enquanto que o pico de emissão foi $2 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ maior na área em MD. O aumento da absorção e da emissão na área em MD indica que as plantas estavam crescendo. Na janela o) o gado permaneceu apenas os 6 dias iniciais no

footprint da área em MD e apesar do pico de absorção ser menor neste manejo, a emissão apresenta valores similares em ambos, o que pode ser explicado pelo curto período em que o gado esteve neste potreiro, que pode não ter afetado muito a vegetação (quantidade de biomassa).

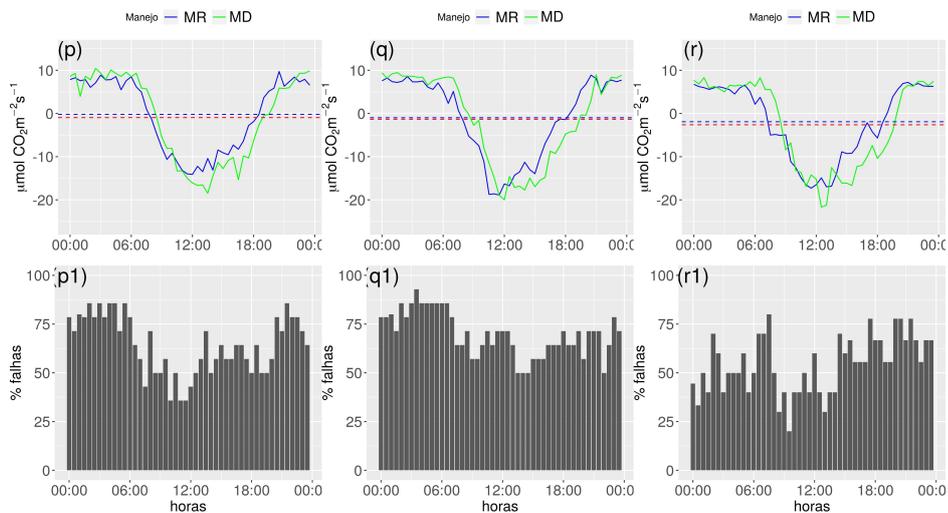
Ao compararmos as médias do *Grupo 1* e do *Grupo 2*, observa-se que a área em MD apresentou os menores valores médios de CO_2 , o que faz com que este manejo seja, à primeira vista, um sumidouro de dióxido de carbono.

As janelas p), q) e r) apresentam grande porcentagem de falhas, comprometendo os valores bissemanais médios calculados, portanto, não serão discutidos.

Figura 4.13 – Ciclo médio diário para seis períodos de duas semanas de avaliação (m-r) para a segunda metade do *Grupo 2*. A linha pontilhada azul representa a média dos fluxos para MR e a vermelha para MC.



(a) Grupo 2 m); n); o).



(b) Grupo 2 p); q); r).

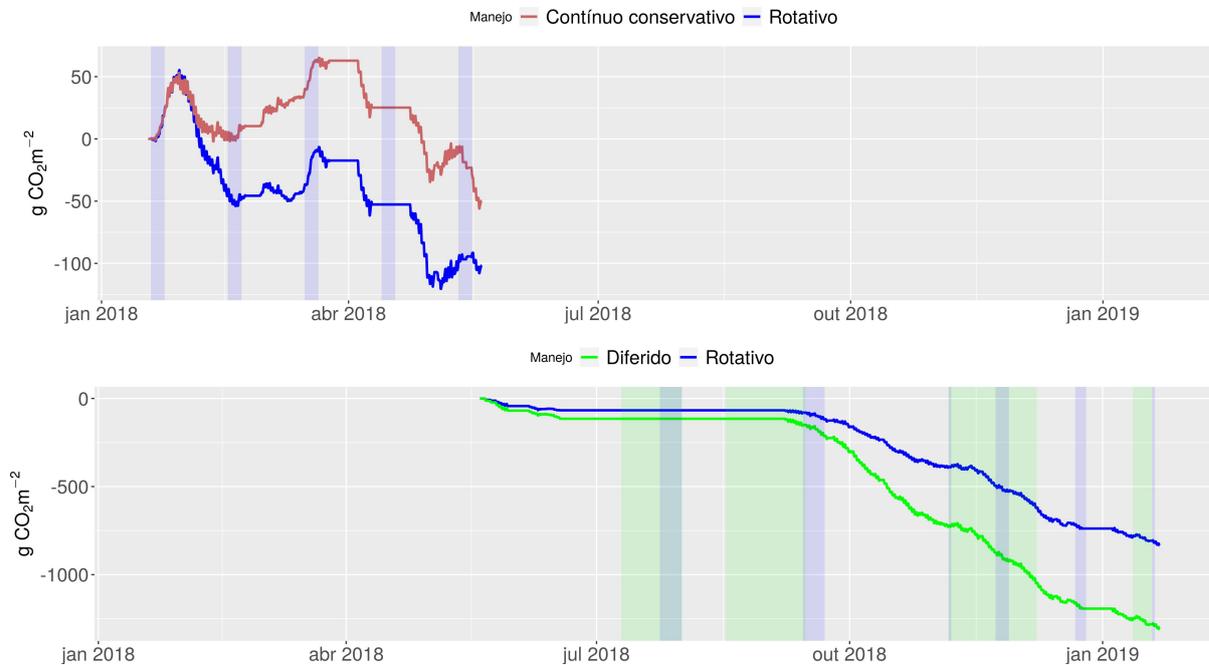
Fonte: Autor.

4.0.4 Soma cumulativa

A soma cumulativa do fluxo de CO_2 é importante para entender a variação destes ao longo do tempo, permitindo estimar se em um determinado período o ecossistema está absorvendo/emitindo CO_2 da/para a atmosfera. A Figura 4.14 mostra a soma cumulativa dos fluxos de CO_2 para o *Grupo 1* e *2*. As lacunas nos gráficos de fluxo CO_2 representam os períodos sem dados, que foram considerados nulos na soma cumulativa. O *Grupo 1*, ao final do período analisado apresentou absorção de CO_2 em ambos os manejos, mas 50% maior na área do footprint da torre localizada no tratamento MR do que na que estava no tratamento MC. No entanto, de janeiro a metade de fevereiro ambas as áreas mostraram emissão líquida de CO_2 para a atmosfera, ultrapassando $50 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2}$, provavelmente devido ao déficit hídrico e à dificuldade de desenvolvimento das plantas em ambos os manejos. Quando ocorreu precipitação, no final de janeiro, ambas as torres indicaram diminuição na soma cumulativa, contudo, o footprint da torre em MR passou a absorvedor de CO_2 mais eficiente após metade de fevereiro (chegando a $-50 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2}$), quando ainda é registrada pouca precipitação. Esse aumento na absorção de CO_2 continuou até o início de março, sendo a soma cumulativa próxima a zero na área do footprint em MC. Assim, em um período mais seco a área do footprint em MR se comportou como absorvedor mais eficiente, mesmo com a umidade do solo similar nas duas áreas. Na segunda metade de março ocorreu precipitação maior que 125 mm, período no qual a soma cumulativa aumentou no footprint em MC, porém, após rápida emissão, a área do footprint em MR passou a absorver CO_2 . O aumento na soma cumulativa pode ser devido ao R_g baixo durante o dia, causado pela nebulosidade e aumento da umidade relativa. No final de abril nota-se que os dois footprints apresentaram comportamento similar, porém em MR houve maior acúmulo de CO_2 . De forma geral, nota-se que a área do footprint em MR foi mais eficiente no acúmulo de CO_2 , principalmente em períodos mais secos.

Analisando os 3 primeiros períodos em que o gado esteve na região de footprint sob MR (faixas azuis), não se observa diferença que possa ser causada pelos animais na soma cumulativa. A quinta faixa azul mostra diferença no padrão da soma cumulativa nos dois manejos, enquanto o footprint em MR está emitindo o footprint em MC está absorvendo, conforme pode ser observado na Figura 4.15, na quinta faixa. As 3 primeiras faixas apresentam variação correlacionada, ou seja, quando ocorre aumento da soma no footprint em MR, em MC também houve aumento. A quinta faixa está em um período no qual já não há mais deficiência hídrica e mostra aumento da soma cumulativa para a área do footprint em MR à partir do dia 13 de março, período no qual em MC foi registrada diminuição da soma cumulativa. Esse aumento de emissões no footprint em MR pode ser causado pelo pastoreio do gado.

Figura 4.14 – Fluxo de CO_2 para as áreas dos footprints das torres submetidas a diferentes manejos pastoris (Rotativo, Contínuo Conservativo, Diferido) do sítio experimental PELD de Aceguá. As faixas azul e verde representam o período com gado dentro da região do footprint da torre.

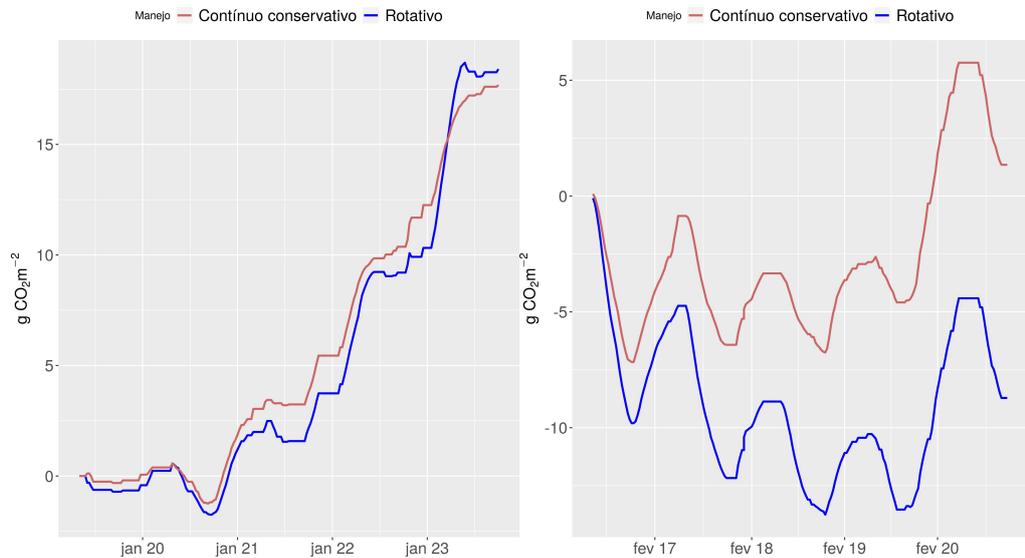


Fonte: Autor.

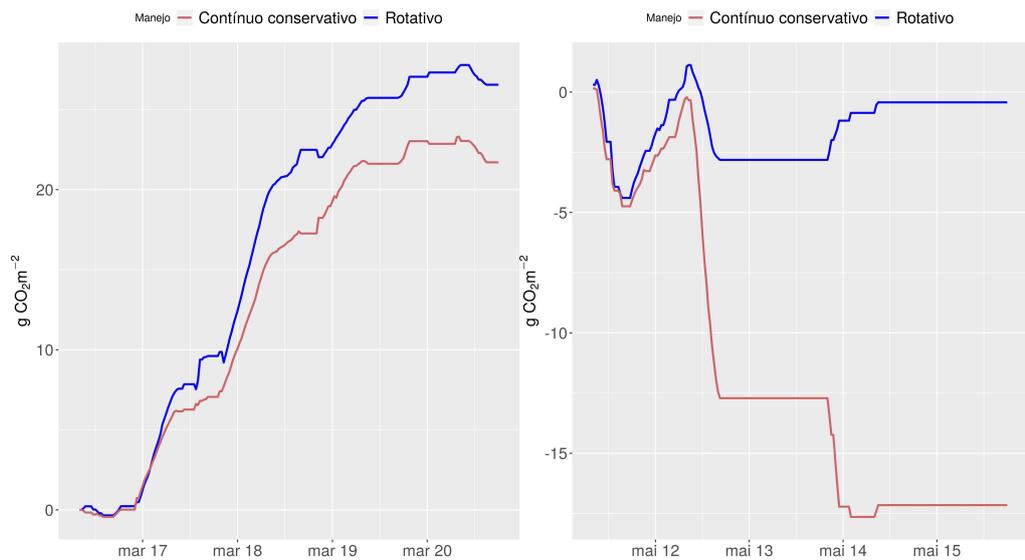
Analisando a soma cumulativa do *Grupo 2*, observa-se que nas duas unidades experimentais houve absorção líquida de CO_2 da atmosfera, mas a área do footprint em MD absorveu 38% a mais que em MR. Não é possível verificar influência direta do período com gado nos fluxos, conforme indicado pelos períodos com faixa verde para MD e azul para MR na Figura 4.14.

Em períodos de seca o comportamento da soma cumulativa variou entre absorção e emissão de CO_2 (*Grupo 1*). Quando não há registro de déficit hídrico (*Grupo 2*), o acumulado mostrou absorção de forma mais eficiente.

Figura 4.15 – Soma cumulativa de CO_2 para o Grupo 1. Cada quadro representa uma das faixas com dados da Figura 4.10.



(a) Primeira e segunda faixas.



(b) Terceira e quinta faixas.

Fonte: Autor.

4.0.4.1 Evapotranspiração

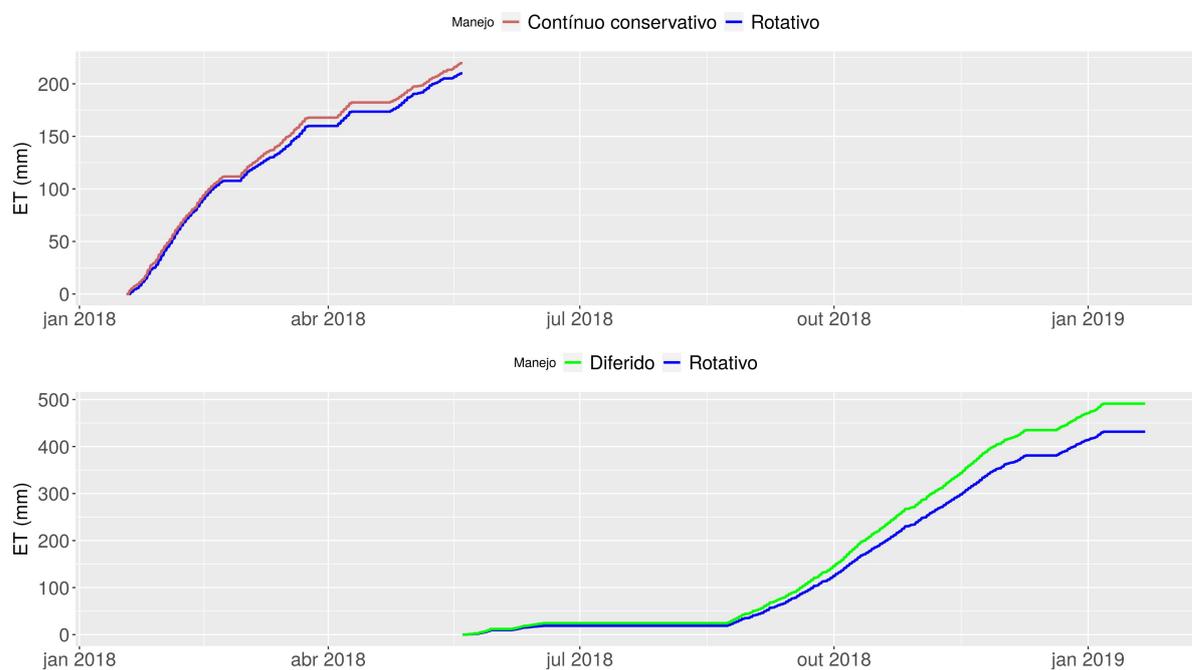
A Figura 4.16 mostra a ET acumulada nos dois Grupos analisados. No Grupo 1, ao final do período, ET foi 209 mm para o footprint da torre em MR e 219 mm em MC, uma diferença de 5% ao final de quase 4 meses. Os valores de ET foram muito similares no período de seca, até a primeira quinzena de março. Quando ocorre precipitação, a ET para a torre em MC aumenta 10% em relação à torre em MR, o que pode ser explicado pela

menor cobertura do solo na vegetação sob MC.

No *Grupo 2* a ET foi maior na área do footprint em MD, 491,72 mm acumulados, contra 431,57 mm em MR, o que representa uma diferença de 13%. Essa diferença na ET acumulada pode ser devido à diferenças na vegetação nas áreas dos footprints das duas unidades experimentais submetidas aos diferentes manejos pastoris, tanto o tipo quanto a quantidade de biomassa.

O acumulado da ET para os dois *Grupos* aumentou linearmente no período analisado independente do tratamento da área do footprint.

Figura 4.16 – Evapotranspiração (ET) para os dois Grupos do sítio experimental.



Fonte: Autor.

4.0.5 Fluxos depois de preenchidos

As falhas nos dados das torres nos manejos rotativo, contínuo e diferido devido a problemas nos sensores e remoção pelo controle de qualidade dos dados foram preenchidas utilizando as técnicas de preenchimento de dados citadas anteriormente (REICHSTEIN et al., 2005), conforme o fluxograma da Figura 2.5. Esta metodologia de preenchimento de dados e particionamento dos fluxos de CO_2 está implementada no site <https://www.bgc-jena.mpg.de/REddyProc/brew/REddyProc.rhtml>, onde foi escolhido o método noturno de particionamento dos fluxos, conforme a equação 2.11.

O período de julho até metade de setembro de 2018, no qual os sensores do MR estavam sendo consertados não foi preenchido devido ao tamanho da falha.

Devido à menor turbulência em períodos noturnos, o que limita o funcionamento da técnica EC, é nesta faixa de horários que são removidos a maior quantidade de dados (principalmente pelo filtro de u^*). O preenchimento de dados é necessário para preencher estas lacunas e contabilizar os fluxos noturnos na soma cumulativa, já que no período noturno ocorre a maior taxa de respiração do ecossistema (fluxo positivo), devido à ausência de radiação solar.

4.0.5.1 Médias diárias

A Figura 4.17 mostra a média diária das componentes do balanço de energia para as áreas dos footprints das três torres nos diferentes manejos. Nota-se uma sazonalidade bem definida para R_N e LE, o que não é observado em H e G. Para as torres em MR e MC, no verão de 2018, observa-se que H e LE apresentaram valores próximos, principalmente no período mais seco. No inverno H apresentou valores médios diários negativos, ou seja, a atmosfera aquece o solo neste período.

Figura 4.17 – Média diária das componentes do balanço de energia para as torres em MR, MC e MD, respectivamente.



Fonte: Autor.

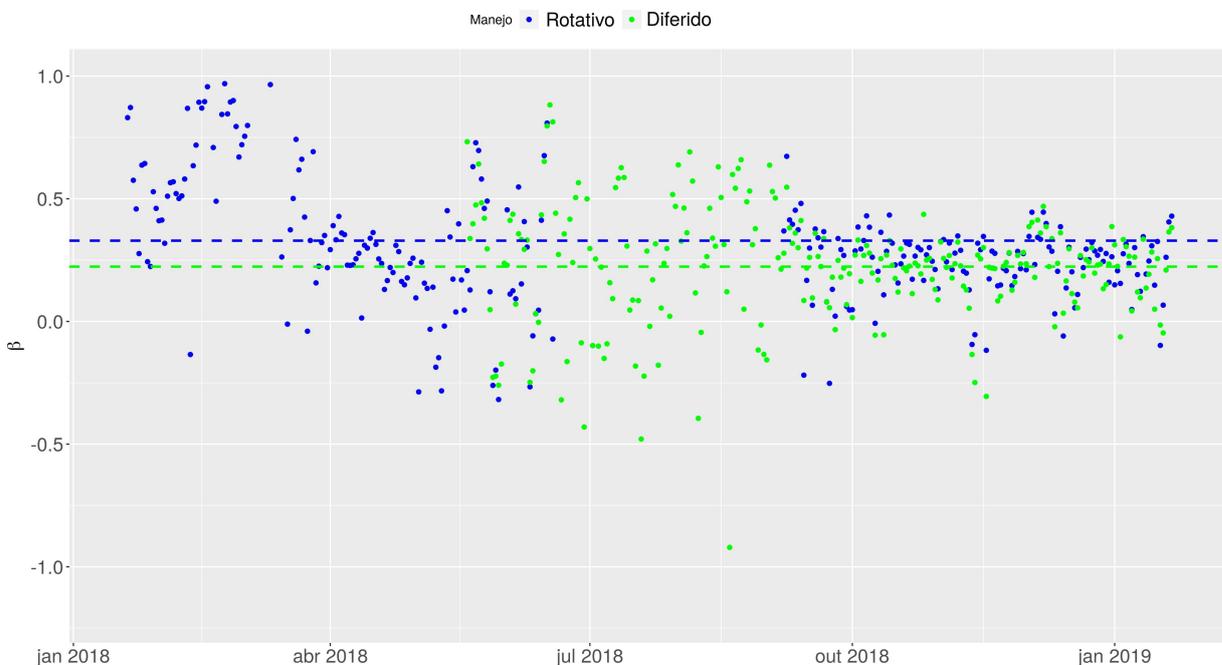
4.0.5.2 Razão de Bowen

A razão de Bowen, Figura 4.18, é dada pela equação 2.13 e mostra o particionamento da energia utilizada para aquecer a atmosfera (H) e para evapotranspiração (ET). Na média, LE foi maior que H para as torres nos dois manejos, o que pode ser observado pelas linhas pontilhadas, 0,30 para o MR e 0,31 para o MD. Estes valores são menores que o encontrado por Rubert (2017), para Pampa natural que foi de 0,41. No entanto, Rubert (2017) utilizou 2 anos completos de dados.

Dos meses de janeiro a abril β apresenta os valores mais altos de todo período, o que implica em valores de H muito altos. Isso foi causado pelo déficit hídrico que diminuiu os valores de LE. Após o mês de abril os valores de LE aumentam e os de H diminuem, fazendo os valores de β diminuírem. Após a metade de setembro, os valores de β para as torres em MR e MD foram muito similares e sem muita oscilação ou sazonalidade aparente. Durante o inverno o MD mostrou maior variabilidade de β , causada principalmente pelos valores negativos de H, observados na Figura 4.17.

Os valores médios de β indicam que a maior parte da energia disponível foi utilizada para evapotranspiração durante todo o período analisado, em ambas as torres. Situação similar foi encontrada por Rajan, Maas e Cui (2015) em pastagens no Hemisfério Norte.

Figura 4.18 – Razão de Bowen para MR e MD. A linha azul pontilhada representa a média de β para a torre em MR e a linha verde em MD.

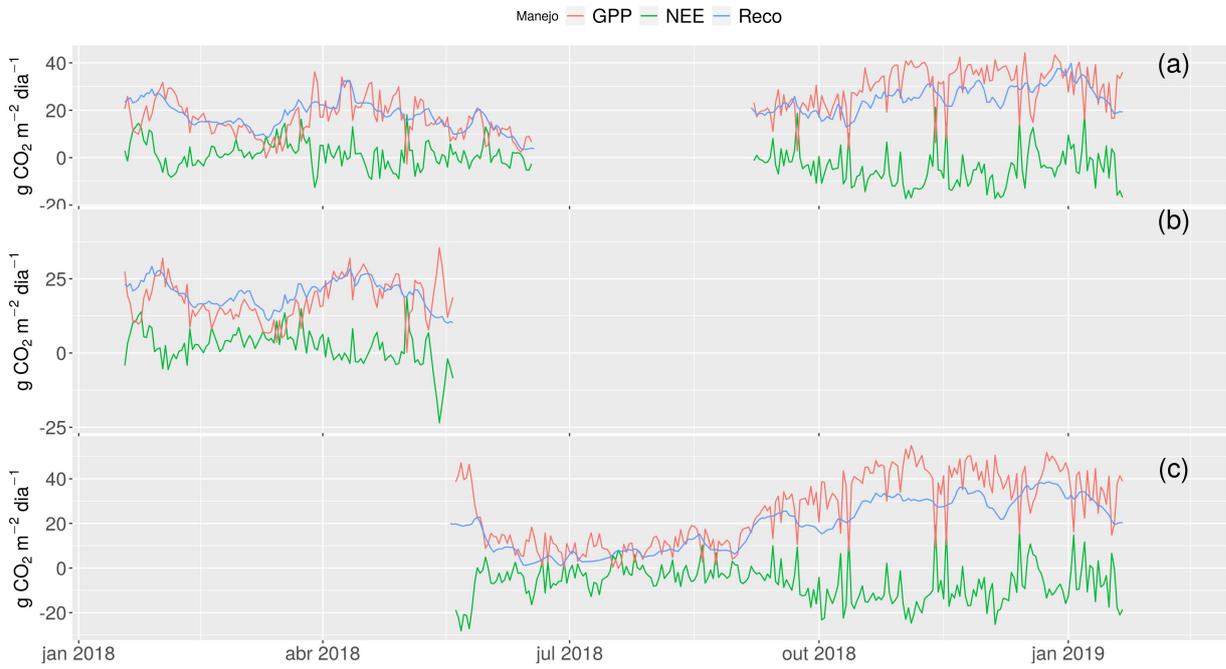


Fonte: Autor.

4.0.5.3 Partição dos fluxos de CO_2

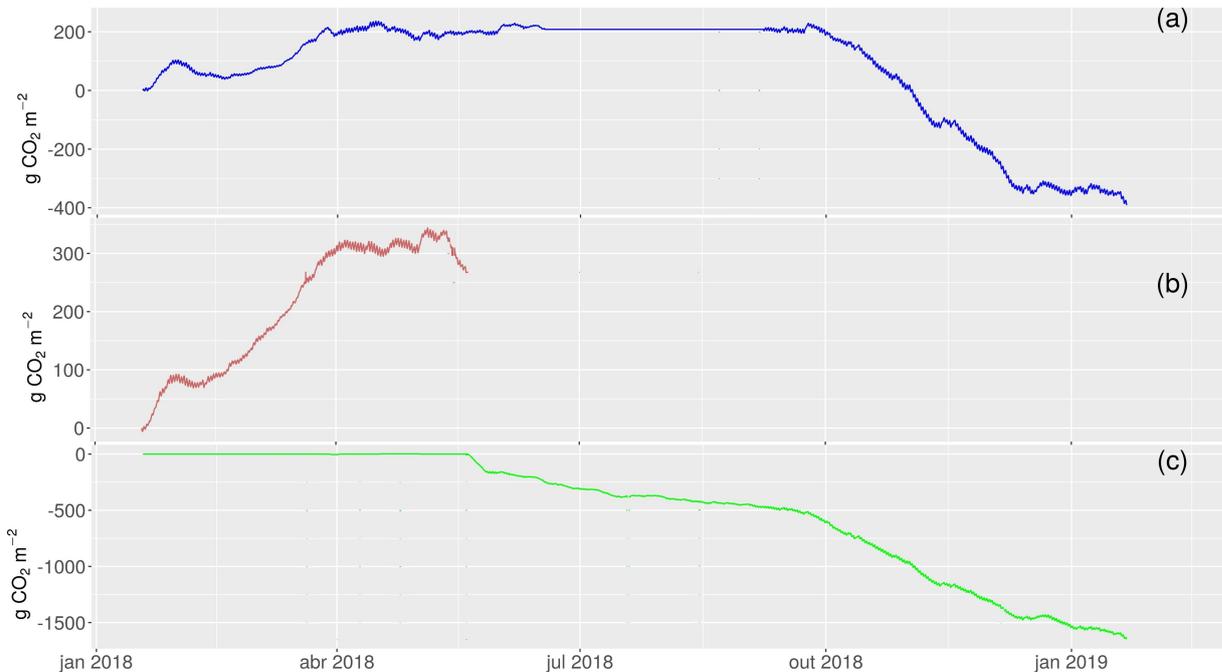
Para facilitar a análise, os valores de GPP serão utilizados como positivos. A Figura 4.19 mostra a partição do fluxo de CO_2 em GPP (assimilação) e R_{eco} (emissão) para os três manejos. A torre em MC indica valores médios de NEE e GPP maiores, $1,99 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $18 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente, em comparação a $1,63 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $17,47 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a torre em MR. A R_{eco} foi maior para a torre em MC ($20 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) em comparação a $19,12 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em MR. Os valores maiores de R_{eco} no MC indicam que houve respiração, mesmo com menor biomassa de plantas que na área submetida a MR. Apesar de GPP (assimilação) também ter sido maior na área sob MC, o balanço do fluxo de CO_2 mostrou menor emissão de CO_2 na área sob MR. A Figura 4.20a,b) mostra a soma acumulada das emissões de CO_2 para o *Grupo 1*, onde se pode observar que as áreas sob ambos os manejos emitiram CO_2 para a atmosfera durante o período analisado, $199 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2}$ para a área sob MR e $243 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2}$ para MC, contudo, a área em MR passa a absorver CO_2 ao final do estudo e em MC, na metade de maio já estava absorvendo CO_2 da atmosfera, representado pela taxa de crescimento negativa na Figura 4.20b). Ao observarmos a série temporal completa da Figura 4.19, percebe-se que a amplitude dos fluxos do *Grupo 1* (em a) e b)) é similar ao período de inverno na área em MD. Esses valores foram causados pelo déficit hídrico de janeiro a março e pela menor quantidade de radiação de abril a 17 de junho, que diminui a fotossíntese (absorção) e faz a emissão de CO_2 aumentar (R_{eco}). A taxa de crescimento do CO_2 acumulado é positiva de janeiro até o início de fevereiro, o que representa emissão de CO_2 para a atmosfera. Com a ocorrência de precipitação, mesmo que de baixa intensidade, a taxa de crescimento passa a ser negativa por alguns dias (absorção de CO_2 da atmosfera). Com temperatura elevada, umidade relativa baixa e deficiência hídrica, a taxa volta a ser positiva e assim permanece até maio.

Figura 4.19 – Partição do fluxo de CO_2 líquido (NEE) em produção primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (R_{eco}) para: a) MR; b) MC; c) MD.



Fonte: Autor.

Figura 4.20 – CO_2 acumulado no período estudado para: a) MR; b) MC; c) MD. Com o preenchimento das falhas (em sua maioria de fluxo positivo, devido à falhas no período noturno), a soma acumulada é diferente para os dados não preenchidos (Figura 4.14). Para o particionamento dos fluxos, determinação da soma acumulada de CO_2 e estimativa de fonte e/ou sumidouro de C da atmosfera, as metodologias de preenchimento de dados são fundamentais e mundialmente utilizadas.



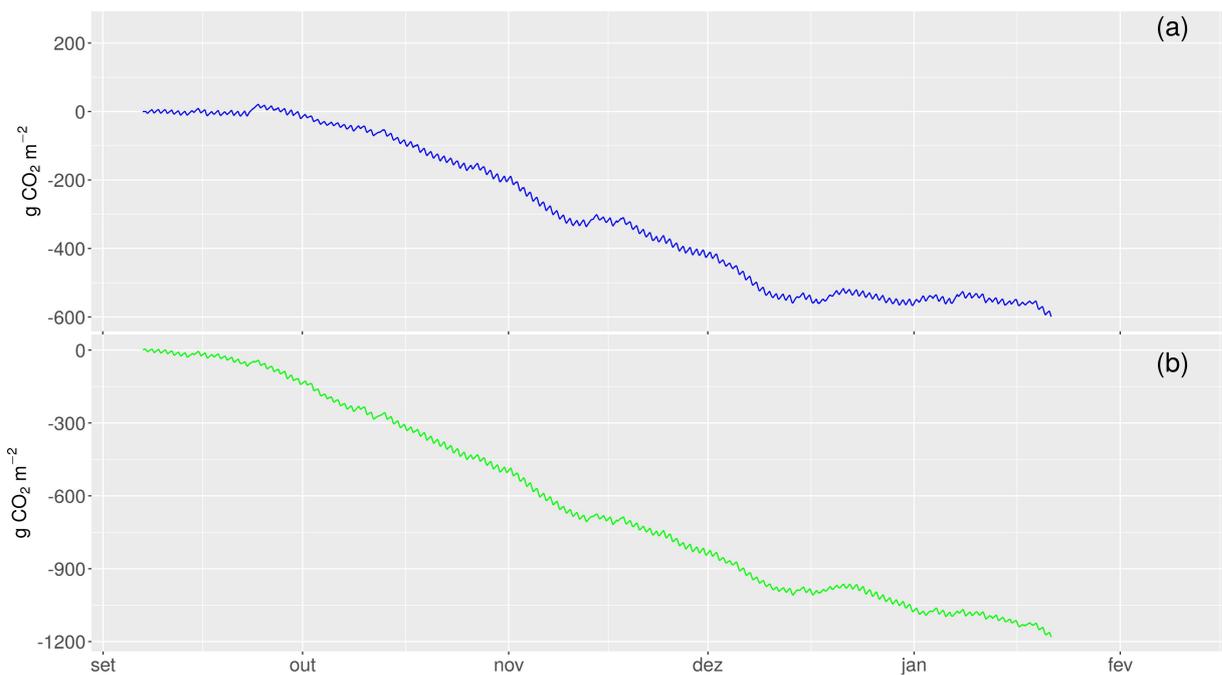
Fonte: Autor.

De junho à metade de setembro há dados apenas para a torre localizada na área em MD, Figura 4.19c). Os valores de NEE, R_{eco} e GPP mostram amplitude menor, $-1,06 g CO_2 m^{-2}$, $2,46 g CO_2 m^{-2}$ e $3,52 g CO_2 m^{-2}$, respectivamente, o que é ocasionado pela menor quantidade de radiação disponível para fotossíntese e pelas baixas temperaturas que dificultam o crescimento das plantas. A Figura 4.20c) mostra a soma acumulada de CO_2 para a área em MD, onde se observa que esta área se comporta como sumidouro de CO_2 desde o início do Grupo 2, enquanto que a área em MR mostra neutralidade (de 19 de maio até a falhas nos dados). A Figura 4.21 mostra o acumulado de CO_2 para as áreas em MR e MD após a lacuna, para melhor análise dos fluxos do Grupo 2. A partir de 7 de setembro (após a lacuna), GPP e R_{eco} aumentam e NEE diminui em ambas as áreas.

A diminuição de NEE acumulado ocorre devido às condições de temperatura, precipitação e R_g favoráveis ao crescimento das plantas, o que causa absorção de CO_2 da atmosfera. Em geral, as duas áreas comparadas no Grupo 2 se comportam como sumidouros de CO_2 da atmosfera de setembro a metade de dezembro, o que pode ser observado pela taxa de crescimento da soma cumulativa na Figura 4.21. A partir da metade de dezembro se observa aumento de R_{eco} em conjunto com diminuição de GPP, indicando

diminuição da assimilação de CO_2 mas respiração do ecossistema alta. Essa diminuição ocorreu devido à menor quantidade de R_g disponível causado por altos índices pluviométricos (BERGER et al., 2019). Ao final do período do *Grupo 2*, ambas as áreas se comportaram como sumidouros de CO_2 da atmosfera, contudo, houve absorção líquida de $1181,3 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2}$ em MD e de $599,3 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2}$ em MR, uma diferença de quase 50%.

Figura 4.21 – CO_2 acumulado para período estudado para as áreas submetidas aos tratamentos: a) MR; b) MD.



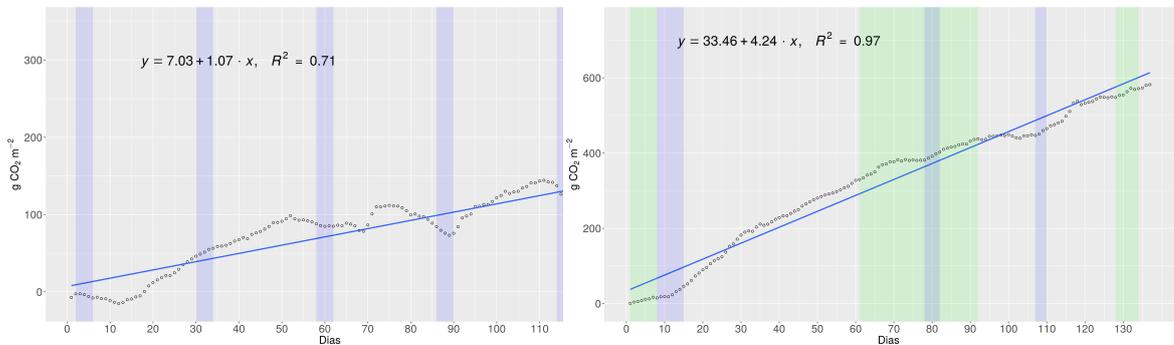
Fonte: Autor.

4.0.5.4 Comparação da soma acumulada entre os manejos

Na análise da Figura 4.22 a seguir foram computadas as médias diárias do fluxo de CO_2 para cada área. Realizou-se a soma cumulativa da diferença dos fluxos do *Grupo 1* (MC-MD) e do *Grupo 2* (MR-MD) após a lacuna e determinou-se a regressão linear. Nas Figuras 4.22a e 4.22b, as faixas azuis representam o período em que o gado estava dentro da região do footprint da área em MR e as faixas verdes o período em que o gado estava dentro do footprint em MD. Analisando o período completo, não se pode afirmar que tenha havido influência do gado nos fluxos. A regressão linear para o *Grupo 1* ($y = 7,03 + 1,07.x$, $R^2 = 0,71$) mostra que em média, a área em MR emite $1 \text{ g } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ a menos que em MC. A dispersão nos dados pode ser consequência da influência da seca nos fluxos. Para o *Grupo 2*, a regressão linear ($y = 33,46 + 4,24.x$, $R^2 = 0,97$) indica que

a área em MD apresentou absorção de $4,24 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ a mais que em MR.

Figura 4.22 – Soma acumulada da diferença do fluxo de CO_2 : a) MC-MR; b) MR-MD. As faixas azuis representam gado na região do footprint em MR e as verdes em MD. A linha azul representa o ajuste linear.



(a) Grupo 1 MC-MR.

(b) Grupo 2 MR-MD.

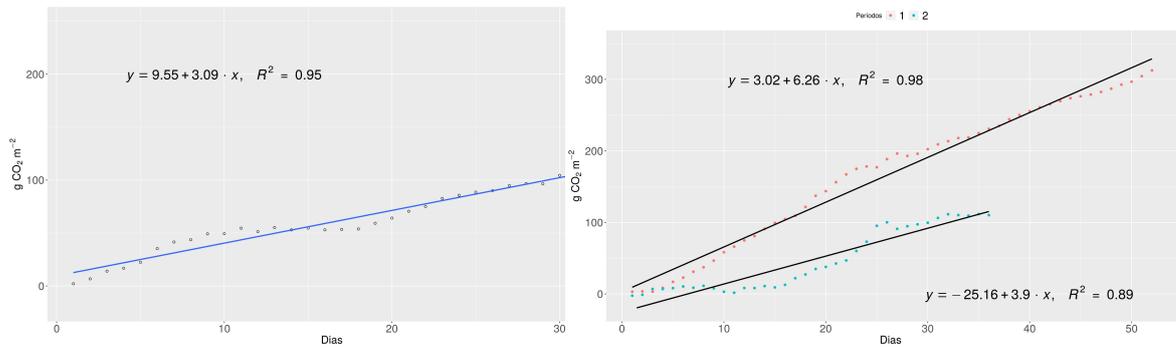
Fonte: Autor.

A Figura 4.23 mostra a divisão do Grupo 2 em 2 partes: com gado na região do footprint em MD e sem gado na região do footprint em MD. Os 2 períodos sem gado correspondem a: 15/09 a 05/11 (período 1) e 08/12 a 12/01 (período 2). O período com gado corresponde a: 06/11 a 07/12. Na Figura 4.23a que representa período com gado, se observa pelo ajuste linear ($y = 9,55 + 3,09 \cdot x$, $R^2 = 0,95$) que na área em MD houve absorção média de $3 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ a mais em MR, valor 27% menor do que o encontrado para todo o período do Grupo 2. Quando comparados aos dois períodos em que não há gado na região do footprint em MD, que mostra absorção média de $6,26 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o período 1 e $3,9 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para o período 2, percebe-se que a presença do gado influencia negativamente a soma cumulativa do CO_2 . Essa influência chega a 40% do valor acumulado de CO_2 . Isso quer dizer que a área em MD apresentou absorção de maior quantidade de CO_2 da atmosfera em períodos sem gado próximo à torre, contudo, esse período de descanso e crescimento da vegetação do potreiro entre o pastejo é importante na variação dos fluxos. Gomez-Casanovas et al. (2018) compararam os fluxos de CO_2 para duas pastagens na Flórida, utilizando quase 3 anos de dados de EC, de 2013 a 2015, um com manejo similar ao MD e outro sem gado, ambos pastagens naturais sem adubação. Em seu estudo encontraram que o manejo similar ao MD era um sumidouro de CO_2 e o manejo não pastado variava entre fonte de CO_2 para a atmosfera e neutro (soma cumulativa nula). Portanto, uma mudança grande no período de descanso do potreiro ou no número de dias que o gado permanece no mesmo pode influenciar os fluxos de CO_2 .

Esses resultados indicam que a área em MD foi mais eficiente no acúmulo de CO_2 , seguido pelas áreas em MR e MC, respectivamente (acúmulo do $MD > MR > MC$). Sob o ponto de vista econômico, o MR é provavelmente o manejo mais custoso, devido à quantidade de mão de obra para rotacionar o gado e para instalação e reparo das cercas, seguido por MD e MC. Outro ponto importante é que, se estes resultados se confirmarem

nas demais repetições do experimento, uma mudança no manejo mais tradicional no estado do RS pode contribuir significativamente para a mitigação dos efeitos da pecuária no aquecimento global.

Figura 4.23 – Soma acumulada da diferença do fluxo de CO_2 : a) 15/09 a 05/11; b) Período 1 15/09 a 05/11 e Período 2 08/12 a 12/01.



(a) Soma acumulativa das áreas em MR-MD para período com gado em MD. (b) Soma acumulativa das áreas em MR-MD para período sem gado em MD.

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

A proposta do trabalho foi analisar as trocas de CO_2 nas três áreas submetidas aos diferentes tipos de manejo pastoril do sítio experimental de Aceguá, localizado no bioma Pampa gaúcho, e discutir possíveis relações desses fluxos com as variáveis ambientais e com o pastejo dos animais e o tipo de manejo pastoril. A determinação destes fluxos em áreas sob diferentes tipos de manejo pastoril é importante para a conscientização da sociedade da importância da preservação do bioma Pampa devido ao seu potencial econômico e ecologicamente sustentável.

O fechamento do balanço de energia encontrado para as áreas sob MR, MC e MD foi de 66%, 70% e 71%, respectivamente. As diferenças no fechamento do balanço de energia entre as três áreas avaliadas decorrem de diferenças na declividade do terreno e diferente velocidade de fricção em cada Torre.

Ao final do período de análise para o *Grupo 1* de observações pareadas, tanto a área em MR quanto em MC foram consideradas fontes de CO_2 para a atmosfera, com emissão de $199\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}$ na área em MR e $243\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}$ em MC. Durante o período de seca ocorreu diminuição da assimilação de CO_2 (GPP aumenta) pelo ecossistema e aumento da R_{eco} (respiração). Provavelmente, a seca foi o fator que fez com que as duas áreas comparadas no *Grupo 1* sejam consideradas fonte de CO_2 . As áreas avaliadas no *Grupo 2* foram consideradas sumidouro de CO_2 , com absorção de $1181,3\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}$ na área em MD e $599,3\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}$ em MR ao final do período analisado, 244 dias.

A presença do gado na região do footprint das torres de fluxo não se reflete diretamente nos fluxos de 30 minutos. Sua influência foi, porém, detectada pela diferença da soma cumulativa entre as áreas comparadas em cada *Grupo*. No *Grupo 1*, a área em MR emitiu $1\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ a menos que a área em MC, enquanto que no *Grupo 2* a área em MD absorveu em média $4,24\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ a mais MR. Separando o *Grupo 2* em período com gado e sem gado dentro da região do footprint da área em MD obtêm-se:

a) Sem gado; MD com absorção de $6,26\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ a mais que MR no período 1, e $3,9\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ a mais que em MR no período 2.

b) Com gado; MD com absorção de $3,09\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ a mais que MR.

A presença do gado na região do footprint da área em MD faz com que a absorção de CO_2 pela área em MD diminua. Essa diminuição variou de $0,81\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ a $3,17\text{ g } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$. Maior quantidade de dados é necessária para análise de períodos com gado na região do footprint da área em MD.

Os resultados mostram que a área avaliada em MD absorveu mais CO_2 da atmosfera, seguido pelas áreas em MR e MC (absorção $MD > MR > MC$). Economicamente MC é mais viável e MR é o tipo de manejo mais caro devido ao maior uso de mão de obra e custo de implementação, contudo, a área em MD foi a alternativa que se mostrou mais be-

néfica quanto ao fluxo de CO_2 . A se confirmarem essas tendências nas demais repetições (blocos) do experimento, ficará evidenciado que mudanças simples no manejo de pecuária podem contribuir significativamente na emissão de GEE e na preservação do bioma Pampa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICULTURE, U. S. D. of. **Brazil: Livestock and Products Annual: Livestock.** 2018. <<https://www.fas.usda.gov/data/brazil-livestock-and-products-annual-3>>. [Acessado em 06 abr 2018].

ARYA, P. S. **Introduction to micrometeorology.** [S.l.]: Elsevier, 2001. v. 79.

AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the euroflux methodology. In: **Advances in ecological research.** [S.l.]: Elsevier, 1999. v. 30, p. 113–175.

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

AUGUIE, B. **gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid"Graphics.** [S.l.], 2017. R package version 2.3. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>>.

BAGGIO, R. **Estratégias de manejo adaptativo para os Campos Sulinos.** 2017. 129 p. Tese (Doutorado em Ecologia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates.** [S.l.]: SC-DLO, 1995.

BERGER, S. et al. The impact of rain events on co2 emissions from contrasting land use systems in semi-arid west african savannas. **Science of the total environment**, Elsevier, v. 647, p. 1478–1489, 2019.

BURBA, G. **Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates.** [S.l.]: Li-Cor Biosciences, 2013.

BURBA, G.; ANDERSON, D. **A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: principles and workflow examples for scientific and industrial applications.** [S.l.]: Li-Cor Biosciences, 2010.

CEPAGRI. **Centro de pesquisas meteorológicas e climáticas aplicadas a agricultura.** UNICAMP, 2010. Acessado em 10 abr 2018. Disponível em: <<https://www.cpa.unicamp.br/artigos-especiais/umidade-do-ar-saude-no-inverno.html>>.

CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T. Variações climáticas na precipitação no sul do brasil no clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, 2015.

CHAHINE, M. T. The hydrological cycle and its influence on climate. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 359, n. 6394, p. 373, 1992.

CIÊNCIA, T. e. I. M. Ministério da. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** [S.l.]: MCTI Brasília, 2016.

CLIMA, C.-G. de Mudanças Globais de. **3ª Comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima.** 3. ed. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

DOLL, D.; CHING, J.; KANESHIRO, J. Parameterization of subsurface heating for soil and concrete using net radiation data. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 32, n. 4, p. 351–372, 1985.

ENSO. **Bureau of Meteorology**. Australian Government, 2018. Acessado em 27 jun 2018. Disponível em: <<http://www.bom.gov.au/climate/enso/outlook/archive.shtml>>.

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.

GARNIER, S. **viridis: Default Color Maps from 'matplotlib'**. [S.l.], 2018. R package version 0.5.1. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=viridis>>.

GARRATT, J.; HICKS, B. Micrometeorological and pbl experiments in australia. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 50, n. 1-4, p. 11–29, 1990.

GILMANOV, T. G. et al. Gross primary production and light response parameters of four southern plains ecosystems estimated using long-term co₂-flux tower measurements. **Global Biogeochemical Cycles**, Wiley Online Library, v. 17, n. 2, 2003.

GOMEZ-CASANOVAS, N. et al. Grazing alters net ecosystem c fluxes and the global warming potential of a subtropical pasture. **Ecological Applications**, Wiley Online Library, v. 28, n. 2, p. 557–572, 2018.

GROLEMUND, G.; WICKHAM, H. Dates and times made easy with lubridate. **Journal of Statistical Software**, v. 40, n. 3, p. 1–25, 2011. Disponível em: <<http://www.jstatsoft.org/v40/i03/>>.

IBGE, I. B. de Geografia e E. **Mapa de Biomas do Brasil**. [S.l.]: IBGE Rio de Janeiro, 2004.

Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas**: Inmet 1981-2010. Brasil, 2018. Acessado em 10 abr 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>.

KANG, X. et al. Effects of grazing on co₂ balance in a semiarid steppe: field observations and modeling. **Journal of Soils and Sediments**, Springer, v. 13, n. 6, p. 1012–1023, 2013.

KNAUER, J. **bigleaf: Physical and Physiological Ecosystem Properties from Eddy Covariance Data**. [S.l.], 2018. R package version 0.6.5. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=bigleaf>>.

KORMANN, R.; MEIXNER, F. X. An analytical footprint model for non-neutral stratification. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 99, n. 2, p. 207–224, 2001.

LONGDOZ, B.; GROSS, P.; GRANIER, A. Multiple quality tests for analysing co₂ fluxes in a beech temperate forest. **Biogeosciences Discussions**, v. 4, n. 6, p. 4197–4228, 2007.

LOVETT, G. M.; COLE, J. J.; PACE, M. L. Is net ecosystem production equal to ecosystem carbon accumulation? **Ecosystems**, Springer, v. 9, n. 1, p. 152–155, 2006.

MMA/IBAMA, M. do meio ambiente/Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: monitoramento do bioma Pampa**. [S.l.], 2010. Acessado em 15 ago 2018.

MONTGOMERY, R. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. **Journal of Meteorology**, v. 5, n. 6, p. 265–274, 1948.

NIMER, E. Climatologia do brasil. **IBGE**, 1989.

OBUKHOV, A. Charakteristiki mikrostruktury vetra v prizemnom sloje atmosfery (characteristics of the micro-structure of the wind in the surface layer of the atmosphere). **Izv AN SSSR, Ser Geofiz**, v. 3, p. 49–68, 1951.

O'MARA, F. P. The role of grasslands in food security and climate change. **Annals of botany**, Oxford University Press, v. 110, n. 6, p. 1263–1270, 2012.

PAPALE, D. Data gap filling. In: _____. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. cap. 7, p. 159–172.

PAPALE, D. et al. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. **Biogeosciences**, v. 3, n. 4, p. 571–583, 2006.

PILLAR, V.; TORNQUIST, C. G.; BAYER, C. The southern brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. **Brazilian Journal of Biology**, SciELO Brasil, v. 72, n. 3, p. 673–681, 2012.

PILLAR, V. d. P. **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. [S.l.]: Ministério do Meio Ambiente, 2009.

PILLAR, V. D. P.; LANGE, O. **Os campos do sul**. [S.l.]: Rede Campos Sulinos-UFRGS Porto Alegre/RS, 2015.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RAJAN, N.; MAAS, S. J.; CUI, S. Extreme drought effects on summer evapotranspiration and energy balance of a grassland in the southern great plains. **Ecohydrology**, Wiley Online Library, v. 8, n. 7, p. 1194–1204, 2015.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na américa do sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 25, n. 2, 2010.

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.

_____. Partitioning of net fluxes. In: **Eddy Covariance**. [S.l.]: Springer, 2012. p. 263–289.

ROJAS-DOWNING, M. M. et al. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. **Climate Risk Management**, Elsevier, v. 16, p. 145–163, 2017.

RUBERT, G. C. D. **Variabilidade sazonal e controle biofísico da evapotranspiração na vegetação do bioma pampa**. 2017. 98 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

SEAPI. **Secretaria da agricultura, pecuária e irrigação**. Governo do estado do Rio Grande do Sul, 2018. Acessado em 10 abr 2018. Disponível em: <<http://www.agricultura.rs.gov.br/inicial>>.

SEFICK, S. **Stream Metabolism-A package for calculating single station metabolism from diurnal Oxygen curves**. [S.l.], 2016. R package version 1.1.2. by Stephen Sefick Jr. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=StreamMetabolism>>.

SMITH, P. et al. Agriculture, forestry and other land use (afolu). Cambridge University Press, 2014.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 13.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 148, n. 3, p. 417–427, 2008.

SWINBANK, W. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal of Meteorology**, v. 8, n. 3, p. 135–145, 1951.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 90, n. 3, p. 311–324, 2009.

United Nations. **United Nations Department of Economic and Social Affairs**. United States, 2013. Acessado em 10 abr 2018. Disponível em: <<http://www.un.org/en/development/desa/news/population/un-report-world-population-projected-to-reach-9-6-billion-by-2050.html>>.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 14, n. 3, p. 512–526, 1997.

WEBB, E.; PEARMAN, G.; RG, L. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water-vapor transfer. v. 106, p. 100, 01 1980.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016. ISBN 978-3-319-24277-4. Disponível em: <<http://ggplot2.org>>.

WILCZAK, J. M.; ONCLEY, S. P.; STAGE, S. A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 99, n. 1, p. 127–150, 4 2001.

WILSON, K. B. et al. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at fluxnet sites. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 38, n. 12, 2002.

WUTZLER, T. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with reddyproc. **Biogeosciences Discussions**, Copernicus Publ., 2018.

XENAKIS, G. **FREddyPro: Post-Processing EddyPro Full Output File**. [S.I.], 2016. R package version 1.0. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=FREddyPro>>.