

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA - SEMA
FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – FAPERGS

**ESTUDO MICROMETEOROLÓGICO E MEDIDAS DE GASES DE
EFEITO ESTUFA NO BIOMA PAMPA: CONEXÕES COM EVENTOS
CLIMÁTICOS EXTREMOS**

Projeto de Pesquisa
EDITAL FAPERGS 05/2023
MONITORAMENTO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NOS CAMPOS E NAS
FLORESTAS

Proponente:
Prof. Dr. Michel Baptistella Stefanello

2 de janeiro de 2024

**EDITAL FAPERGS 05/2023 -
MONITORAMENTO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NOS CAMPOS E NAS FLORESTAS**

1 Identificação do Projeto

Título do Projeto: Estudo micrometeorológico e medidas de gases de efeito estufa no Bioma Pampa: conexões com eventos climáticos extremos.

Resumo

O aumento progressivo da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera constitui a principal causa das mudanças climáticas. Os eventos extremos de temperatura e precipitação, bem como o aumento global da temperatura, observada nos últimos anos, são uma consequência direta das mudanças atuais do Clima. A redução das emissões de GEE e a implementação de medidas de mitigação das mudanças climáticas são vitais para o enfrentamento das questões relacionadas ao aumento da temperatura global e na preservação dos ecossistemas do planeta. Portanto, a identificação e a descrição dos processos de absorção e emissão de GEE nos ecossistemas terrestres são importantes na determinação do potencial de sumidouro de carbono. O conhecimento dos processos físicos de troca, ocorrendo nos ecossistemas permite estabelecer a utilização sustentável destes ambientes. Para caracterizar o papel de cada ecossistema no âmbito das políticas climáticas e dos mercados de carbono é fundamental o emprego de uma metodologia que permita realizar uma quantificação da captura de carbono. O Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria possui experiência em atividades gerais de pesquisa, na formação de recursos humanos e no monitoramento das trocas de GEE por utilizar a técnica de covariância dos vórtices (EC; *Eddy Covariance*). Esta técnica de análise, juntamente com as torres de fluxo, representa uma metodologia robusta para estimar os fluxos de CO₂, vapor d'água entre os ecossistemas e a atmosfera. Como consequência, o presente projeto empregará um conjunto de dados de torres de fluxo e a metodologia de EC para dar continuidade e uma maior amplitude nas atividades de monitoramento e quantificação das trocas de GEE (CO₂ e H₂O) no Bioma Pampa do Rio Grande do Sul. Adicionalmente, pretende-se investigar a influência de eventos extremos de temperatura e precipitação (excesso ou falta de chuva) nos processos de trocas de GEE e, da mesma forma, a resiliência deste Bioma frente a cenários envolvendo condições meteorológicas extremas. Compreender as dinâmicas que controlam as trocas turbulentas e de GEE no Bioma Pampa é essencial para elaborar estratégias de redução dos GEE e para entender, de modo mais completo como a mitigação destes gases influencia o meio ambiente. Com o desenvolvimento do projeto pretende-se continuar coletando dados científicos relacionados as trocas turbulentas de GEE no sul do Brasil. Esses dados irão fornecer uma base sólida para a elaboração de um cenário que promova a sustentabilidade nos âmbitos ambiental, social e econômico, buscando a conservação do bioma Pampa. Além disso, este conjunto de dados poderá ser empregado na calibração de modelos numéricos meteorológicos melhorando a previsão do Tempo e do Clima, bem como nos modelos teóricos que predizem as emissões de GEE.

Palavras Chave: Fluxo de CO₂, eddy covariance, eventos extremos de temperatura e precipitação, mudanças climáticas.

Nome da Proponente: Prof. Dr. Michel Baptistella Stefanello
Professor Adjunto-A do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Maria.

Link do currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3098224557315011>

Instituição de execução do projeto: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Vigência: 36 meses

Área do conhecimento predominante e áreas do conhecimento correlatas: Micrometeorologia; Meteorologia; Ciências Ambientais.

2 Caracterização do problema

Os gases de efeito estufa (GEE) liberados na atmosfera, devido às atividades humanas, são interpretados atualmente como os principais responsáveis do aquecimento global [1]. O aumento dos níveis de concentração dos GEE na atmosfera contribuem fortemente nos processos de mudanças climáticas, influenciando a temperatura média do planeta, e provocando o seu aumento observado nas últimas décadas [1]. Portanto, a fim de contextualizar a influência dos GEE no clima e nos ambientes terrestres é fundamental compreender os processos físicos e dinâmicos que regem a absorção ou emissão desses constituintes atmosféricos.

Na camada limite atmosférica (CLA), encontram-se as principais fontes e sumidouros de GEE. A CLA é a porção mais baixa da atmosfera terrestre e caracterizada pela presença de movimentos turbulentos [2, 3]. A CLA interage diretamente com os diferentes tipos de superfície e os seus movimentos associados à turbulência são responsáveis pelo estabelecimento de fluxos de GEE, calor, momento e energia entre a superfície e a atmosfera [2, 3, 4]. Identificar e descrever os fenômenos físicos que promovem o transporte na CLA é de fundamental importância na previsão meteorológica do Tempo e, a longo prazo, para se compreender a física do clima e dos eventos extremos associados às mudanças climáticas [5]. Da mesma forma, a compreensão das interações entre a superfície e a atmosfera permite parametrizar e implementar as condições realísticas de contorno superficiais em modelos numéricos de previsão do Tempo, em modelos que descrevem os processos de absorção e emissão de GEE nos ecossistemas [6, 7], e em aplicações hidrometeorológicas [8].

O vapor d'água é o gás de efeito estufa mais prevalente e significativo na atmosfera. No entanto, as atividades humanas exercem apenas uma influência direta limitada sobre a quantidade de vapor d'água no meio ambiente. Indiretamente, as atividades humanas têm o potencial de impactar substancialmente o vapor d'água devido às mudanças climáticas. O dióxido de carbono (CO_2) é o segundo gás de efeito estufa mais relevante. A concentração de CO_2 na atmosfera tem aumentado significativamente nas últimas décadas devido a vários fatores, tais como: a utilização de combustíveis fósseis, aquecimento, resfriamento de edifícios e na produção de cimento, entre outros, conforme indicado pelo [1]. Da mesma forma, o desmatamento libera CO_2 e diminui a sua absorção pelas plantas. Além disso, o CO_2 é liberado em processos naturais, como a decomposição da matéria vegetal.

Do ponto de vista das mudanças climáticas, além de restringir as emissões de gases de efeito estufa provenientes de combustíveis fósseis e do uso do solo é crucial encontrar métodos eficazes que possibilitem a captura do carbono presente na atmosfera. Algumas soluções para este problema são propostas. Neste sentido, a mitigação de CO_2 envolve a prática agrícola e pecuária sustentável, o plantio de árvores e o reflorestamento entre outros [9]. Além disso, é fundamental compreender os ecossistemas naturais para conhecer o seu potencial de absorção e, desta forma, através de políticas de valorização destes ecossistemas, promover o seu uso sustentável, reduzindo assim, a degradação do meio ambiente. Para conferir credibilidade a essas soluções, bem como caracterizar o papel de cada ecossistema no âmbito das políticas climáticas e dos mercados de carbono, é fundamental o emprego de uma metodologia que permita realizar uma verificação precisa da captura de carbono [10]. Esse processo de verificação pode ser realizado pelo emprego da técnica micrometeorológica de covariância dos vórtices, do inglês *Eddy Covariance* (EC). Este método de análise juntamente com as torres de fluxos, representa uma ferramenta robusta para medir diretamente os fluxos de CO_2 , vapor d'água entre os ecossistemas e a atmosfera [11].

Nos últimos anos, a determinação dos fluxos de quantidades escalares e vetoriais, entre a superfície e a atmosfera têm demonstrado a importância do conhecimento da micrometeorologia na definição dos padrões de trocas GEE. Atualmente, mais de 900 plataformas empregam a técnica EC para determinar os fluxos de energia, vapor d'água, momento e CO_2 em diversos ecossistemas terrestres (<https://fluxnet.org/sites/site-summary/>). As trocas de GEE entre a superfície e os níveis mais elevados da CLA são influenciadas não apenas pela disponibilidade, intensidade e distribuição

espacial de fontes e sumidouros, mas também pela dinâmica dos movimentos turbulentos [4, 2]. Este movimentos de diferentes escalas, representam o principal mecanismo físico que promove a troca gases entre a superfície e os níveis mais altos da CLA. Entre os diversos escalares cujos fluxos são calculados por meio da técnica EC, estão os fluxos de energia (em suas formas de calor sensível e latente) e o dióxido de carbono (CO_2) os quais se destacam como aqueles mais frequentemente observados, medidos e analisados. O fluxo de CO_2 fornece uma estimativa dos efeitos conjuntos dos processos de fotossíntese e respiração do ecossistema, desempenhando um papel fundamental na caracterização de um ambiente específico em relação ao seu potencial de emissão ou absorção de CO_2 [12]. Por outro lado, os fluxos de calor sensível e latente assumem um papel preponderante no balanço de energia na superfície.

As altas temperaturas e os desastres correlacionados, como a perda de colheitas agrícolas, incêndios florestais, escassez de água, poluição atmosférica e emissões de CO_2 através de atividades antropogênicas e dos ecossistemas, exercem um impacto significativo na sociedade e no meio ambiente [1]. Em termos mais amplos, existem evidências de uma tendência positiva de aumento na intensidade e frequência das altas temperaturas em escala global e regional [1]. Este efeito, gera uma preocupação pública e exige que os gestores, baseados no conhecimento técnico e científico, tomem decisões acertadas que possam auxiliar, prever e, desta forma, minimizar o efeito destrutivo provocado por eventos extremos meteorológicos (excesso ou falta de precipitação, temperaturas elevadas e períodos longos de seca). A compreensão acerca de como as mudanças climáticas afetam os ecossistemas permanece limitada. Esta falta de conhecimento está associada a um entendimento muito limitado dos processos de troca ocorrendo entre a superfície terrestre e a atmosfera [1].

Particularmente, os eventos extremos de temperatura provocam alterações que afetam as trocas de diferentes escalares entre a superfície e a atmosfera, causando modificações nos mecanismos de transporte e nos fluxos turbulentos. Como um exemplo do impacto de eventos extremos de temperatura nos fluxos de CO_2 , pode ser citado o estudo recentemente realizado por [13]. Nesta investigação, empregando-se dados obtidos pela técnica de EC os autores mostram uma redução da absorção líquida de carbono durante as condições de temperaturas extremas registradas na Europa. Da mesma forma, os autores apontam que em locais específicos, observou-se uma liberação generalizada de carbono pelas florestas.

No contexto da América do Sul, o Brasil possui uma extensão territorial continental e apresenta uma biodiversidade muito grande envolvendo distintos ecossistemas, que caracterizam os Biomas brasileiros. Desta forma, avaliar o impacto das mudanças climáticas nos ecossistemas é uma atividade complexa, visto que muitos destes ecossistemas ainda não foram estudados durante condições meteorológicas e climáticas esperadas para uma determinada época do ano. Um exemplo é o Bioma Pampa no centro sul da América Latina. Este Bioma presente no sul do Brasil, Uruguai e parte da Argentina, apresenta extensos campos compostos de gramíneas que oferecem condições propícias para a criação de animais [14]. Nesta região as chuvas costumam ser regulares ao longo do ano [15]. Todavia, nos últimos anos, foram observados eventos extremos de temperatura nas distintas estações do ano e secas mais intensas nos verões. Estes padrões meteorológicos extremos afetam o desenvolvimento da vegetação e, como consequência, a atividade de pecuária, representando perdas econômicas para a região.

Embora alguns estudos indiquem que as pastagens naturais envolvidas na atividade de pecuária sejam fontes de carbono [16] ou se comportam como ecossistemas neutros [17], outros estudos têm mostrado que estes sistemas de produção representam importantes sumidouros [18, 19, 20, 21]. Neste contexto, as pastagens nativas precisam ser investigadas para se obter o entendimento mais completo do seu papel na mitigação de GEE [22, 23].

O presente projeto empregando um conjunto de dados de torres micrometeorológicas tem como objetivo principal dar continuidade as atividades de monitoramento e ampliar a estrutura física de

medição das trocas de GEE (CO_2 e H_2O) no Bioma Pampa brasileiro. Adicionalmente, pretende-se investigar a influência de eventos extremos de temperatura e precipitação nos fluxos de GEE e, por meio de observações fornecidas por radiossondagem, relacionar estas medidas com a estrutura física da CLA. A pesquisa proposta no projeto se destaca por ser um estudo que, além de monitorar o ecossistema em relação ao seu potencial de absorção e emissão de CO_2 e taxa de vapor d'água, desenvolverá um conhecimento mais amplo, descrevendo as diferentes escalas meteorológica influenciando o processo e permitindo uma conexão com outros estudos, os quais irão diretamente se beneficiar dos resultados gerados no desenvolvimento do projeto.

3 Objetivos e metas

Este projeto tem como objetivo principal dar continuidade e ampliar o monitoramento de GEE avaliando o impacto de eventos extremos de temperatura e precipitação nos processos de trocas turbulentas no Bioma Pampa brasileiro.

Para realizar este projeto elenca-se os objetivos específicos e as suas respectivas metas:

1. Ampliar a estrutura física de monitoramento de GEE no Bioma Pampa brasileiro.
 - 1.1 Meta 1: Aquisição de uma torre de fluxo para medidas contínuas na superfície;
 - 1.2 Meta 2: Instalar uma torre de fluxo em uma área do Bioma Pampa, na região oeste do RS, possivelmente próximo ao município de Alegrete-RS;
 - 1.3 Meta 3: Adicionar mais um nível de medida de GEE na torre de fluxo já instalada (desde 2012) em uma área experimental do Bioma Pampa localizada em Santa Maria-RS;
2. Continuar o monitoramento das trocas turbulentas de GEE por meio da técnica de EC.
 - 2.1 Meta 4: Coletar dados continuamente das torre de fluxo durante um período de três anos: uma na cidade de Santa Maria (já instalada) e a outra no novo sítio experimental, possivelmente próximo à cidade de Alegrete - RS.
3. Estimar os fluxos turbulentos de dióxido de carbono (CO_2), vapor d' água e calor sensível;
 - 3.1 Meta 5: Avaliar o padrão sazonal e anual dos fluxos turbulentos de GEE.
4. Monitorar a estrutura vertical da CLA durante condições extremas de temperatura.
 - 4.1 Meta 6: Aquisição dos equipamentos para a realização de radiossondagem;
 - 4.2 Meta 7: Realizar duas campanhas experimentais de lançamento de radiossondas atmosféricas em uma região próxima as torres de fluxos.
5. Monitorar a resposta do Bioma Pampa durante condições de eventos extremos de temperatura e precipitação.
 - 5.1 Meta 8: Associar medidas micrometeorológicas e de radiossondagem para identificar o papel dos eventos extremos de temperatura do ar e precipitação nas trocas turbulentas dos GEE no Bioma Pampa.
 - 5.2 Meta 9: Identificar o papel da temperatura do solo nas trocas de GEE.
6. Aprimorar a método de estimativas dos fluxos de GEE.
 - 6.1 Meta 10: Propor melhorias na metodologias de estimativa dos fluxos turbulentos durante condições noturnas caracterizadas por vento fraco e forte estratificação estável.

- 6.2 Meta 11: Testar metodologias que permitam completar dados perdidos. Ressalta-se que esta falta de dados ocorre com frequência durante observações micrometeorológicas realizadas no período noturno.
7. Proporcionar o aprimoramento pessoal e acadêmico;
- 7.1 Meta 12: Formar recursos humanos altamente qualificados para realização de medidas e análise de dados micrometeorológicos de GEE.
8. Divulgar os resultados obtidos em conferências e em revistas científicas.
- 8.1 Meta 13: Publicar trabalhos científicos em revistas especializadas de alto fator de impacto.
- 8.2 Meta 14: Participar de eventos científicos, locais, nacionais e internacionais, bem como feiras e exposições.

4 Metodologia e estratégia de ação

- Eddy Covariance (EC)

Nos últimos anos, a técnica de EC tem sido amplamente utilizada para mensurar as trocas de GEE entre os ecossistemas e a atmosfera [11, 12, 24]. Esta técnica é considerada o estado da arte nas estimativas dos fluxos de GEE. O fluxo é uma quantidade muito importante, pois representa a variável que promove a ligação entre a superfície e a atmosfera. A técnica de EC permite a medição precisa e não destrutiva dos fluxos em alta resolução temporal e em nível de ecossistema, tornando-se uma ferramenta única e valiosa.

A metodologia EC estima as trocas de gases entre a superfície adjacente e a atmosfera, analisando a covariância estatística entre as flutuações temporais da velocidade vertical do vento e as flutuações temporais da concentração dos gases de interesse (H₂O e CO₂). A turbulência é o mecanismo físico robusto de transporte e portanto, desempenha um papel fundamental nas trocas de GEE. A turbulência e a interação entre a superfície atmosfera é objeto de estudo primário na micrometeorologia. Matematicamente, o método de EC estima os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e latente (LE) e dióxido de carbono (F_c) através das equações abaixo [25, 4]:

$$\begin{aligned} H &= \rho_{ar} c_p \overline{w' T'} \\ LE &= \rho_{ar} L_v \overline{w' q'} \\ F_c &= \overline{w' \rho'_c} \end{aligned} \quad (1)$$

sendo que: ρ_{ar} é a densidade do ar; c_p é o calor específico do ar à pressão constante; w' representa as flutuações da velocidade vertical do vento; T' expressa o desvio em relação à média da temperatura do ar; L_v é o calor latente de vaporização, q' representa as flutuações da umidade específica do ar e ρ'_c representa as flutuações da densidade do CO₂.

É importante mencionar que, para estimativa dos fluxos de GEE, a técnica de EC utiliza medições de alta frequência (10 Hz, ou seja, 10 medições por segundo) da velocidade vertical do vento e de uma quantidade escalar (CO₂, H₂O, temperatura). Normalmente, os equipamentos que realizam tais medidas são agrupados em uma estrutura conhecida como “torre de fluxo” (Figura 1). A torre de fluxo representa um sistema que, por meio do método de EC, permite o monitoramento das emissões ou absorções de carbono, bem como a transferência de água e calor entre um ecossistema e a atmosfera.

Atualmente, o Laboratório de Micrometeorologia da UFSM é responsável pela rede SULFLUX, a qual é formada por um conjunto de torres de fluxo, efetuando medidas em uma alta frequência de resolução temporal em distintos ecossistemas do sul do Brasil (Figura 2).



Figura 1: Figura 1 – Torre micrometeorológica instalada no sítio experimental da Universidade Federal de Santa Maria, localizada em uma área de 24 ha de pastagem natural típica do Bioma Pampa.



Figura 2: Figura 2 – Torres micrometeorológicas (torres de fluxo) da rede Sulflux.

- Processamento dos dados de *eddy covariance* (EC)

O processamento dos dados micrometeorológicos obtidos pela técnica de EC é um processo fundamental na obtenção de estimativas adequadas das trocas turbulentas dos GEE entre a superfície e

a atmosfera. Para esta finalidade, além de ser necessário o emprego de técnicas apropriadas é fundamental ter o conhecimento em relação a estrutura da turbulência e dos processos físicos e dinâmicos que controlam o escoamento da CLA, bem como da sua estrutura vertical.

Devido ao número elevado de dados medidos pelo sistema EC, neste projeto, os dados brutos serão processados por um software comercial (EddyPro®, V 5.1.1 – Li-Cor, Lincon, Nebraska, USA). Para o cálculo dos fluxos os seguintes procedimentos serão utilizados: cálculo dos fluxos utilizando uma janela temporal de 30 minutos, correções devido às flutuações de densidade [26], rotação de coordenadas dupla [27], correção do ângulo de ataque para as componentes do vento [28], maximização da covariância (padrão) para compensação da defasagem de tempo entre os sensores, filtro passa alta e baixa [29], testes de controle de qualidade dos fluxos [30].

Após o cálculo serão realizadas algumas análises e filtrações nos fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) e CO_2 a fim de eliminar possíveis valores espúrios e manter as medidas dentro dos padrões físicos. Os limites físicos dependem das características dos padrões turbulentos e das condições ambientais. O procedimento de filtração nos dados e incluindo os dias de mal funcionamento dos equipamentos resultaram em falhas nos fluxos, que podem ser preenchidas a partir de técnicas desenvolvidas para fechamento de dados de alta frequência.

Além da filtração das variáveis de fluxos superficiais, devemos nos atentar as medidas das variáveis ambientais, tais como: temperatura do ar, radiação global, umidade relativa e precipitação. Essas variáveis são o primeiro passo para a filtração e preenchimento dos fluxos superficiais de GEE. Quando tais variáveis apresentam falhas de medidas há necessidade de preenchimento, sendo primeiramente através de uma interpolação linear simples para intervalos menores que 3 horas (exceto precipitação), e falhas superiores a este intervalo, é necessário utilizar uma regressão linear simples entre os dados da torre de fluxo com a estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ou dados de reanálise para assim ajustar as medidas e preencher medidas faltantes.

Para quantificar a contribuição do ecossistema estudado para o balanço de CO_2 atmosférico, as falhas nos dados de fluxo de CO_2 necessitam ser preenchidas. Neste estudo, o preenchimento final dos dados faltantes dos fluxos superficiais é realizado através do pacote *REddyProc* disponível para a versão do software RStudio, utilizando os seguintes parâmetros: temperatura do ar, radiação global, umidade relativa, fluxo de calor sensível e latente. Este pacote foi desenvolvido através dos métodos propostos por [31]). Diversos trabalhos apontam que os fluxos de energia H somado ao LE é menor quando comparado ao saldo de radiação menos o fluxo de calor no solo ($R_n - G$), chegando a uma diferença em torno de 10 a 30%, necessitando ajuste nos valores de H e LE [32, 33, 34]. Desta forma, há necessidade do fechamento do balanço de energia utilizando a técnica da razão de Bowen [35] para as medidas de LE e H obtidas pelas torres de fluxo através da técnica de EC.

- Novo sítio experimental

Nos últimos anos, o Laboratório de Micrometeorologia tem realizado medidas de GEE por meio da técnica de EC em dois sítios experimentais localizados no Bioma Pampa. As medições de EC começaram no sítio experimental de Santa Maria-RS em 2012, enquanto no sítio de Aceguá - RS, tiveram início em 2018. No âmbito deste projeto, estamos propondo a instalação de uma nova torre de fluxo, em um sítio experimental localizado mais a oeste do RS, possivelmente próximo à cidade de Alegrete-RS. A escolha do sítio próximo ao Alegrete se justifica pelo fato de ser um ponto de medição mais a oeste no estado do Rio Grande do Sul, complementando nossas medidas já existentes nas regiões central (Santa Maria) e sul (Aceguá) do estado. Além disso, esta região possui uma extensa área de pastagens naturais dedicada à pecuária o que permitirá uma melhor caracterização do Bioma Pampa brasileiro.

- Radiossondagem

Uma maneira de analisar e compreender os padrões que governam o escoamento turbulento, os seus movimentos associados e as suas implicações nos fluxos GEE pode ser obtida pelo estudo da estabilidade e da estrutura vertical da CLA. A técnica de investigação por radiossondagens atmosféricas permitem investigar a profundidade vertical da atmosfera. Esta investigação ocorrendo por meio de sondas transportadas por balões meteorológicos fornece uma detalhada informação a cerca do perfil vertical de temperatura, da magnitude e direção da velocidade do vento, umidade relativa e pressão. Analisando-se estes perfis, parâmetros importantes da CLA podem ser obtidos. Por exemplo, a estrutura do perfil de temperatura e umidade permite estimar com precisão a altura da camada limite diurna. Da mesma forma, o perfil de temperatura e a magnitude da velocidade do vento fornecem informação valiosas acerca do tipo de camada limite noturna estável. Uma noite com magnitude de baixa de vento e apresentando um perfil de temperatura do tipo exponencial informa a presença de uma camada limite noturna muito estável. Neste caso particular, os fluxos turbulentos ficam muito reduzidos e as regiões verticais camada limite noturna ficam desconectadas. Em tais situações os fluxos verticais de GEE ficam muito reduzidos e, muitas vezes, são descartados da análise, um fato que gera uma falta de informação destas quantidades. Por outro lado, em situações de ventos moderados a fortes o resfriamento da camada limite estável é dominada por efeitos turbulentos os quais ativam as trocas de GEE, isto pode ser visto na redução da curvatura do perfil de temperatura. Como consequência, os dados fornecidos pelas radiossondagens, no período da noite, indicam claramente a existência ou não da atividade turbulenta gerando os fluxos de GEE.

Adicionalmente, os dados de radiossondagem irão capturar os efeitos nos perfis verticais causados por eventos extremos de calor ou ondas de calor.

5 Resultados e impactos esperados

A presente iniciativa de pesquisa pretende responder questões referentes aos processos de emissão e de absorção de GEE no Bioma Pampa. A seguir são listadas as principais perguntas que serão respondidas a partir dos resultados obtidos na investigação que será realizada:

- Qual é o potencial de absorção de CO₂ pelo Bioma Pampa?
- Quais são os padrões de emissão e absorção de CO₂ sazonais e anuais do Bioma Pampa e quais são as condições de Tempo e do Clima que favorecem tais situações?
- Qual é o comportamento e a magnitudes da concentração do CO₂ e dos fluxos de GEE durante os eventos extremos de temperatura no Bioma Pampa?

Ressalta-se que com a maior frequência de ocorrência de eventos extremos de temperatura na atualidade, estes questionamentos são de importância fundamental na previsão de eventos meteorológicos e climáticos extremos. Com todas estas informação pretende-se investigar o fenômeno de aquecimento global cientificamente comprovado, ocorrendo nos distintos ambientes do planeta Terra, no Bioma Pampa.

Com base nas atividades originadas pela pesquisa, elenca-se os possíveis resultados esperados e determinações de mitigação dos impacto ambiental:

- Auxiliar no desenvolvimento de políticas públicas para a manutenção e o uso sustentável do Bioma Pampa e, desta forma, evitar que ele seja degradado ou substituído por outras culturas agrícolas as quais poderiam ter um potencial de aumentar consideravelmente as emissões de GEE;

- Colaborar no estabelecimento de medidas que permitam desacelerar as mudanças do Clima e seus impactos na sociedade e no ambiente;
- Promover ações de valorização do Bioma Pampa, considerando-se as atividades sociais e financeiras que priorizam os produtos gerados de forma sustentável;
- Auxiliar no cálculo de quantificação de emissão de GEE, ocorrendo no Bioma Pampa, junto aos mercados de crédito de carbono;
- Desenvolver ações que permitam a captura de CO₂ da atmosfera e, desta forma, minimizar o impacto causado pelas mudanças climáticas;
- Promover a melhoria das atividades de previsões de Tempo a partir de observações detalhadas das relações entre a turbulência e os padrões médios da atmosfera. A compreensão destas conexões representa um avanço importante na área de previsão Meteorologia e a longo prazo de Clima;
- Melhorar os modelos que estimam as taxas de absorção e emissão de GEE nos ecossistemas;
- Gerar expressivo conhecimento científico ambiental no estado do RS e, desta forma, publicar artigos em revistas com alto fator de impacto. As publicações permitirão o estabelecimento de conexões científicas mais consolidadas internacionalmente proporcionando que diferentes grupos de pesquisa possam acessar os resultados e visualizar de forma clara o que está sendo realizado em termos de estudos envolvendo os GEE no RS;
- Formar novos recursos humanos e, da mesma forma, manter os grupos de pesquisa que já possuem conhecimento científico e tecnológico dos processos físicos que serão desenvolvidos neste projeto.

6 Cronograma, riscos e dificuldades

O planejamento das atividades que serão executadas ao longo do projeto é apresentado na Tabela 1. Os riscos e as dificuldades são mencionados abaixo:

- Coleta e análise de dados de GEE: Os processos de interação superfície-atmosfera e, bem como os fluxos de GEE, são amostrados com sensores de alta frequência, os quais são instalados no ambiente atmosférico e coletam continuamente dados. Este sistema pode sofrer a ação de fenômenos meteorológicos adversos bem como de instabilidades inerentes a recursos de hardware. Os sensores podem deixar de coletar dados por ausência de energia elétrica, por problemas nas conexões entre os diferentes sensores e os sistemas de armazenamento de dados, etc. O Laboratório de Micrometeorologia da UFSM possui uma experiência consolidada na coleta e análise de dados micrometeorológicos associados com as trocas de GEE ocorrendo entre a superfície e a baixa atmosfera [36, 37, 38, 39, 40]. Os recursos humanos, formados por este grupo, dominam o conhecimento das atividades de coleta de dados e dos processamentos de fluxos superficiais empregando o método de EC. Este domínio de conhecimento, pode ser comprovado pelo número de artigos científicos publicados em revistas especializadas nos últimos anos. Portanto, a equipe do projeto possui toda a experiência e conhecimento para solucionar as possíveis dificuldades ocorrendo no desenvolvimento da pesquisa e, desta forma, garantindo que uma coleta e análise de dados seja realizada com um nível de sucesso satisfatório.

Tabela 1: Cronograma do Projeto

	1ºAno		2ºAno		3ºAno	
Metas/semestre	1º	2º	1º	2º	1º	2º
1.1 Aquisição de uma torre de fluxo para medidas contínuas na superfície.	X					
1.2 Instalar uma torre de fluxo em uma área do Bioma Pampa, na região oeste do RS, possivelmente próximo ao município de Alegrete-RS.	X	X				
1.3 Adicionar mais um nível de medida de GEE na torre de fluxo já instalada (desde 2012) em uma área experimental do Bioma Pampa localizada em Santa Maria-RS.		X				
2.1 Coletar dados continuamente das torre de fluxo durante um período de três anos: uma na cidade de Santa Maria (já instalada) e a outra no novo sítio experimental, possivelmente próximo à cidade de Alegrete - RS.	X	X	X	X	X	X
3.1 Avaliar o padrão sazonal e anual dos fluxos turbulentos de GEE.			X	X	X	X
4.1 Aquisição dos equipamentos para a realização de radiossondagem;	X	X				
4.2 Realizar duas campanhas experimentais de lançamento de radiossondas atmosféricas em uma região próxima as torres de fluxos.				X		X
5.1 Associar medidas micrometeorológicas e de radiossondagem para identificar o papel dos eventos extremos de temperatura do ar nas trocas turbulentas dos GEE no Bioma Pampa.				X	X	X
5.2 Identificar o papel da temperatura do solo nas trocas de GEE.			X	X	X	X
6.1 Propor melhorias na metodologias de estimativa dos fluxos turbulentos durante condições noturnas caracterizadas por vento fraco e forte estratificação estável.				X	X	X
6.2 Testar metodologias que permitam completar dados perdidos. Ressalta-se que esta falta de dados ocorre com frequência durante observações micrometeorológicas realizadas no período noturno.		X	X			
7.1 Formar recursos humanos altamente qualificados para realização de medidas e análise de dados micrometeorológicos de GEE.	X	X	X	X	X	X
8.1 Publicar trabalhos científicos em revistas especializadas de alto fator de impacto.			X	X		X
8.2 Participar de eventos científicos, locais, nacionais e internacionais, bem como de feiras e exposições.		X		X	X	X

- Campanha de radiossondagem: Uma campanha de análise de dados de campo em meteorologia é uma atividade complexa. Esta complexidade, do ponto de vista técnico e científico, resulta dos fenômenos físicos de distintas escalas presentes na atmosfera e as suas interações. Por outro lado, as dificuldades operacionais para a realização de uma campanha observacional podem estar associadas as questões envolvendo condições meteorológicas adversas, logística, regulamentações, coleta e análise de dados. Uma parte da equipe do projeto é habituada a

fazer previsões de Tempo e Clima e, desta forma, está em condições de selecionar intervalos de observações favoráveis para a realização dos experimentos. Além disso, os pesquisadores que integram a proposta possuem familiaridade com o desenvolvimento de campanhas experimentais envolvendo a coleta de dados atmosféricos. Neste quesito, podem ser citados os seguintes artigos: [40, 41]. Portanto, a equipe é capacitada para planejar e executar campanhas de radiossondagens atmosféricas.

7 Orçamento

O orçamento específico de cada item do projeto está organizado e detalhado nas Tabelas 2-8.

Tabela 2: Orçamento Detalhado

Elementos de Despesa	Custo Total
Consumo	
Diárias	R\$ 49.600,00
Material de Consumo	R\$ 141.676,00
Passagens	R\$ 9.000,00
Serviços de Terceiros	R\$ 121.500,00
Despesas Acessórias de Importação	R\$ 5.469,62
Total Consumo	R\$ 327.245,62
Capital	
Equipamentos e Material Permanente	R\$ 782.630,00
Despesas Acessórias de Importação	R\$ 75.313,00
Total Capital	R\$ 857.943,00
Bolsas	
PDTI-2 – 24 meses	R\$ 124.800,00
PDTI 4 – 24 meses	R\$ 50.400,00
Total Bolsas	R\$ 175.200,00
Valor total	R\$ 1.360.388,62

7.1 Valores específicos

Tabela 3: Diárias

Localidade	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Coleta dados na torre de fluxo ¹	120 (30 meses)*(2x mês)*(2 pessoas)	R\$ 320,00	R\$ 38.400,00
Diferentes localidades ²	35 (5 pessoas)*(7 dias)	R\$ 320,00	R\$ 11.200,00
		Total	R\$ 49.600,00

¹ O valor em diárias é elevado tendo em vista que há necessidade de quinzenalmente visitar as torres de fluxo para coleta dos dados armazenados nos data loggers e para limpeza e manutenção dos equipamentos.

² Participação em eventos científicos.

Justificativa do Orçamento: As torres de fluxo estão equipadas com sensores modernos, a maioria deles importados, os quais estimam os fluxos turbulentos de GEE pela técnica de EC. Esta técnica viabiliza a medição precisa e não destrutiva dos fluxos de GEE em alta resolução temporal, sendo uma ferramenta única e valiosa para avaliação em nível de ecossistema.

Tabela 4: Material de Consumo

Especificação	Quantidade	Valor Unitário	Custo Total
Ferramentas e reposição de material de laboratório, baterias, etc.	-	-	R\$30.000,00
Combustível	(30 meses)*(2x mês)	R\$300,00	R\$ 18.000,00
Material para Radiossondagem	40 lançamentos	U\$ 10,320.00 ²	R\$ 54.696,00
Gás para lançamento dos balões	80 m ³	R\$ 423,75	R\$ 33.900,00
Locação de cilindro para lançamento dos balões	2	R\$ 40,00	R\$ 80,00
Sistema de alimentação da Torre de fluxo ¹	1	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00
		Total	R\$141.676,00

¹ Sistema de alimentação da Torre de fluxo composto por: painel solar, controlador de carga, baterias, cabos, conectores e suporte para painel solar e periféricos necessários para instalação.

² Câmbio R\$5,30

Tabela 5: Passagens

Trecho	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Participação de evento	6	R\$1500,00	R\$9.000,00
		Total	R\$9.000,00

Tabela 6: Serviços de terceiros

Tipo	Especificação	Custo Total
Pessoa Jurídica	Aluguel de veículo (30*2 *R\$ 400,00)	R\$ 24.000,00 ¹
Pessoa Jurídica	Publicação artigos científicos open access	R\$ 37.500,00
Pessoa Jurídica	Manutenção de equipamentos, de servidor de dados e redes sociais	R\$ 60.000,00
	Total	R\$ 121.500,00

¹ Valor calculado tendo em vista a necessidade de quinzenalmente visitar as torres de fluxo para coleta dos dados armazenados nos data loggers e para limpeza e manutenção dos equipamentos.

Tabela 7: Despesas Acessórias de Importação

Especificação	Custo Unitário	Custo Total
Sistema de sondagem - DigiCORA	-	R\$ 19.557,00 ¹
Material para Radiossondagem	-	R\$ 5.469,62 ¹
Torre de fluxo	-	R\$ 55.756,00 ¹
	Total	R\$ 80.782,62

¹ Adicionado 10% do custo de aquisição

O sistema de radiossondagem que possibilita obter informações da atmosfera é um componente crucial na caracterização da estrutura vertical da atmosfera. Os dados fornecidos por este sistema contribuirão significativamente para o avanço do entendimento dos padrões físicos e dinâmicos que regulam os fluxos GEE, especialmente durante eventos climáticos extremos. Além disso, é importante destacar que, após a conclusão do projeto, esse equipamento poderá ser utilizado por outros pesquisadores da UFSM em pesquisas fundamentais relacionadas a problemas e eventos climáticos e ambientais extremos.

As despesas relacionadas a diárias, aluguel de veículos e combustível são fundamentais para a manutenção do projeto e para a realização da campanha experimental de radiossondagem. As viagens para coleta de dados e manutenção preventiva dos sensores são essenciais para garantir séries confiáveis de dados. Propõe-se viagens quinzenais durante 3 anos para permitir a detecção de varia-

Tabela 8: Equipamento e Material Permanente

Especificação	Quantidade	Custo Unitário	Custo Total
Notebook com mochila e mouse	2	R\$ 4.000,00	R\$ 8.000,00
Computador desktop de alto desempenho	2	R\$ 10.000,00	R\$ 20.000,00
HD Externo	3	R\$ 500,00	R\$ 1.500,00
Sistema de sondagem - DigiCORA	1	U\$ 36.900,00 ²	R\$ 195.570,00
Torre de fluxo ¹	1	U\$ 105.200,00 ²	R\$ 557.560,00
		Total	R\$782.630,00

¹ Torre de fluxo composta de analisadores de gás (CO₂ e H₂O), anemômetros sônicos 3D; sensor de temperatura e umidade relativa; sensor de temperatura ar solo água; sensor de fluxo de calor no solo ar solo; sensor de conteúdo de água no solo; sensor de temperatura de superfície infravermelho; sensor de molhamento foliar; saldoradiometro 4 componentes; sensor de radiação; periféricos necessários para instalação de sensor, tais como: cabos, equipamentos para coleta de dados, suportes de sensores e estrutura metálica.

² Câmbio R\$5,30

Tabela 9: Cronograma Financeiro

	1ºAno	2ºAno	3ºAno
Compra do material permanente	x		
Coleta de dados, participação em eventos e cooperação científica	x	x	x

ções climáticas. Embora o projeto tenha duração de 3 anos, os primeiros seis meses serão destinados à organização da instalação dos sensores e seleção das áreas (sítios) para instalação das torres, em colaboração com as instituições parceiras. Além disso, as diárias e passagens serão utilizadas para viagens de cooperação científica e participação em eventos científicos.

Os bolsistas, em conjunto com alunos de pós-graduação e parceiros locais, serão responsáveis pela coleta dos dados e, principalmente, pelo processamento dos fluxos. Os dados das torres de fluxo frequentemente apresentam falhas devido a diversos motivos, incluindo baixa turbulência. É necessário preencher essas lacunas para obter valores integrados e possibilitar balanços em períodos de no mínimo um ano. Portanto, recursos humanos especializados são fundamentais para garantir resultados rápidos e confiáveis.

8 Dados gerados no projeto

Conforme o item 12 do edital, os dados primários gerados no período de vigência da pesquisa serão fornecidos à Sema em formato digital compatível com bancos de dados SQL.

É importante ressaltar que os dados obtidos pela técnica de EC são registrados em alta frequência de amostragem temporal, ou seja, a uma taxa de 10 Hz, correspondendo a 10 medidas por segundo. Portanto, apenas os dados brutos da componente vertical da velocidade do vento, temperatura, concentração de CO₂ e H₂O, saldo de radiação e fluxo de calor no solo serão disponibilizados. Os demais dados coletados na torre serão armazenados no servidor do Laboratório de Micrometeorologia e poderão ser disponibilizados posteriormente para colaboração científica.

Adicionalmente, devido à complexidade na interpretação e análise desses dados, também serão fornecidos os dados processados em médias de 30 minutos. Esses dados incluirão informações sobre os fluxos de CO₂, calor sensível e latente, saldo de radiação, fluxo de calor no solo, bem como outras variáveis meteorológicas e ambientais, tais como: temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento.

9 Instituição executora

O projeto será desenvolvido na Universidade Federal de Santa Maria no Laboratório de Micrometeorologia - Departamento de Física.

É importante ressaltar que o Laboratório de Micrometeorologia da UFSM possui uma consolidada experiência em medidas de fluxos turbulentos e de GEE. Neste laboratório, foi organizado e criado o primeiro congresso brasileiro de micrometeorologia no ano de 1999. A partir deste ano, este evento científico, ocorreu de dois em dois anos e foi coordenado, por 10 edições, pelos pesquisadores deste laboratório. Este congresso sempre reuniu pesquisadores nacionais e internacionais e motivou o desenvolvimento de medidas variadas de fluxos turbulentos, incluindo os de GEE na região da floresta Amazônica e no Pampa Gaúcho. Como consequência o laboratório de micrometeorologia da UFSM dispõe de uma certa infraestrutura para a realização das medidas de GEE e também de pesquisadores que dominam a técnica de EC e possuem experiência em realizar medidas micrometeorológicas e meteorológicas.

Adicionalmente, o cálculo e o processamento dos fluxos de GEE utilizando a metodologia EC é bastante complexa e exige conhecimento computacional e da estrutura física das diferentes tipos de CLA. Neste aspecto, o Laboratório de Micrometeorologia da UFSM tem expertise, com diversos artigos publicados utilizando tais metodologias.

10 Pesquisador proponente

O proponente possui graduação, mestrado e doutorado em Física pela UFSM e realizou parte do seu doutorado no *Institute of Atmospheric Sciences and Climate* - Lecce, Itália. O proponente têm confeccionado artigos internacionais envolvendo temas atuais e complexos abordando as áreas de Micrometeorologia e Meteorologia. Os seus trabalhos publicados envolvem a análise de medidas micrometeorológica, as trocas turbulentas de GEE, ondas de calor no sul do Brasil e eventos extremos locais de temperatura associados a ventos induzidos por topografias. Adicionalmente, o pesquisador proponente possui experiência em simulações numéricas de alta resolução da CLA e em medidas de campo meteorológicas.

O proponente é professor do Departamento de Física da Universidade de Santa Maria, membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia e integra, como pesquisador, o Laboratório de Micrometeorologia. Além disso, é professor da disciplina de Micrometeorologia para o curso de Bacharelado em Meteorologia.

Nos últimos 5 anos o proponente publicou 17 artigos científicos em revistas nacionais e internacionais. A média do fator de impacto dos artigos internacionais publicados neste período foi de 4.67. Cabe-se ressaltar que, recentemente, o proponente teve um projeto de pesquisa aprovado pelo CNPq na chamada CNPq/MCTI Nº 10/2023 - UNIVERSAL. O projeto é intitulado “Análise observacional e numérica de escoamentos descendentes e seus impactos na Camada Limite Atmosférica no sul do Brasil”. Portanto, o pesquisador responsável pelo projeto e o Laboratório de Micrometeorologia da UFSM possuem uma capacitação científica de destaque que permitirá investigar e monitorar as trocas turbulentas de GEE no Bioma Pampa e, da mesma forma, estudar as conexão destes fenômenos de troca com os eventos meteorológicos extremos.

11 Equipe

A equipe do projeto é formada por pesquisadores e técnicos que possuem uma experiência consolidada no argumento central da pesquisa. O projeto será constituído de uma rede nacional e internacional de cientistas especialistas em problemas micrometeorológicos e climatológicos associados a emissão de GEE. Além dos pesquisadores da UFSM farão parte do projeto distintas instituições de pesquisa e ensino brasileiras tais como: o Instituto Federal Farroupilha (IFFar) e a Universidade

Federal do Pampa (UNIPAMPA). No que diz respeito a formação de redes internacionais de pesquisa as seguintes instituições farão parte da proposta: a Universidade de Oklahoma (Norman) e a Universidade da Califórnia (Santa Barbara), EUA. Cabe ressaltar que o grupo de pesquisa da Universidade de Oklahoma possui uma grande experiência em trabalhos envolvendo a área de eventos extremos meteorológicos e temas associados ao estudo de fluxos de GEE. Da mesma forma, a Universidade da Califórnia realiza estudos de eventos extremos de temperatura associados a ondas de calor.

Estas cooperações internacionais permitem que uma comparação permanente de qualidade seja realizada durante todo o desenvolvimento do projeto. Esta rede, formada por distintos pesquisadores garantirá que o projeto de investigação se desenvolva com sucesso e que os seus objetivos possam ser alcançados de um modo satisfatório.

A equipe deste projeto será formada pelos pesquisadores, técnicos e estudantes abaixo relacionados (ver Tabela 10), além de toda a equipe de alunos de iniciação científica e pós-graduação do Laboratório de Micrometeorologia que possuem experiência na manutenção de sensores micrometeorológicos e na coleta e processamento de dados. A equipe principal do projeto fornecerá apoio tanto nas análises e interpretação dos resultados, bem como na construção dos artigos científicos de divulgação.

12 Trabalhos anteriores desenvolvidos recentemente pela equipe que mais se aproximam do tema deste projeto

Abaixo seguem alguns trabalhos publicados pela equipe do projeto, que comprovam a sua experiência no emprego da técnica de EC para investigar as trocas turbulentas de GEE, na investigação de processos turbulentos na CLA, ondas de calor, entre outros.

- 1) **Stefanello, M., et al.** Spatial–Temporal Analysis of a Summer Heat Wave Associated with Downslope Flows in Southern Brazil: Implications in the Atmospheric Boundary Layer. *Atmosphere* 14.1 (2022): 64.
- 2) **Stefanello, M.,** Cava, D., Giostra, U., Acevedo, O., Degrazia, G., Anfossi, D., & Mortarini, L. (2020). Influence of submeso motions on scalar oscillations and surface energy balance. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(727), 889-903.
- 3) Botía, S., Gerbig, C., Marshall, J., Lavric, J. V., Walter, D., Pöhlker, C., ... & **Stefanello, M.,** Acevedo, O. C. (2020). Understanding nighttime methane signals at the Amazon Tall Tower Observatory (ATTO). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(11), 6583-6606.
- 4) da Rosa, C. E., **Stefanello, M.,** dos Reis, N. C. S., Facco, D. S., Teleginski Ferraz, S., Boiaski, N. T., ... & Degrazia, G. A. (2023). Winter heat waves characteristics associated with downslope windstorm in south Brazil. *International Journal of Climatology*.
- 5) Degrazia, G. A., Rizza, U., **Stefanello, M.,** Maldaner, S., Roberti, D. R., Martins, L. G. N., ... & Teichrieb, C. A. (2018). An overview of the micrometeorological field campaign at Santa Maria, Southern Brazil: the Pampa-2016 experiment. *Meteorological Applications*, 25(3), 435-444.
- 6) Acevedo, O. C., Da Silva, R., Fitzjarrald, D. R., Moraes, O. L. L., Sakai, R. K., & Czikowsky, M. J. (2008). Nocturnal vertical CO₂ accumulation in two Amazonian ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G1).

- 7) Acevedo, O. C., Moraes, O. L., Degrazia, G. A., Fitzjarrald, D. R., Manzi, A. O., & Campos, J. G. (2009). Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes?. *Agricultural and forest meteorology*, 149(1), 1-10.
- 8) Duine, G. J., Carvalho, L. M., & Jones, C. (2022). Mesoscale patterns associated with two distinct heatwave events in coastal Santa Barbara, California, and their impact on local fire risk conditions. *Weather and Climate Extremes*, 37, 100482.
- 9) Pinheiro, M. E. O., de Oliveira, P. E., & Acevedo, O. C. (2022). Wind-Speed Controls on Scalar Gradients, Fluxes, and Cospectra in the Stable Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 183(1), 79-96.
- 10) Rubert, G. C. D., de Arruda Souza, V., Zimmer, T., Veeck, G. P., Mergen, A., Bremm, T., ... & Roberti, D. R. (2021). Patterns and Controls of the Latent and Sensible Heat Fluxes in the Brazilian Pampa Biome. *Atmosphere*, 13(1), 23.

Artigos submetidos para a revista Ciência e Natura:

- Título: Trocas de CO₂ em pastagens naturais do Bioma Pampa com criação de gado de corte sob manejo rotacionado. Autores: Alecsander Mergen, Gustavo Pujol Veeck, Valério D. Pillar, Rodrigo Baggio, Fernando L. Ferreira de Quadros, Luciana Marin, Vanessa de Arruda Souza, **Michel Baptistella Stefanello**, Maria Eduarda Oliveira Pinheiro, Daniele Morgenstern Aimi, Débora Regina Roberti.
 - Título: Trocas de CO₂ em dois diferentes manejos de pastagens no Bioma Pampa. Autores: Alecsander Mergen, Vanessa de Arruda Souza Cristiano Maboni, Tiago Bremm, **Michel Baptistella Stefanello**, Maria Eduarda Oliveira Pinheiro, Gustavo Pujol Veeck, Valério D. Pillar, Rodrigo Baggio, Débora Regina Roberti.
 - Título: Comparação de métodos de preenchimento de dados de fluxo de CO₂. Autores: Bernardo Ivo Goltz, Daniele Morgenstern Aimi, Alecsander Mergen, Vanessa de Arruda Souza, Gustavo Pujol Veeck, Tiago Bremm, **Michel Baptistella Stefanello**, Débora Regina Roberti.
- iii. Título: Influência de eventos extremos de calor nos fluxos de energia em área agrícola com trigo no sul do Brasil. Autores: Gustavo P. Veeck, Alecsander Mergen, Vanessa de Arruda Souza, **Michel Stefanello**, Genei Antonio Dalmago, Jorge Alberto de Gouvêa, Cinara Ewerling da Rosa, Débora R. Roberti.

Artigo em preparação para submissão na revista Agricultural and Forest Meteorology :

- Título: Characterization of evapotranspiration partition in natural pastures of the Pampa Biome in southern Brazil. Autores: Gustavo Pujol Veeck, Vanessa de Arruda Souza, **Michel Baptistella Stefanello**, Alecsander Mergen, Tiago Bremm, Anderson Ruhoff, Maria Eduarda Oliveira Pinheiro, Débora Regina Roberti.

Trabalho apresentado e publicado em anais do evento

- Trabalho apresentado e publicado nos anais do evento *Conference on micrometeorological measurements: Urban microclimate monitoring and agricultural meteorology for climate change*, 2023, Roma - Itália.

- i. Título: Long-term micrometeorological observational site in Brazillian Pampa biome. Autores: Débora Regina Roberti, **Michel B. Stefanello**, Otávio Costa Acevedo, Luis Eduardo Medeiros, Felipe D. Costa.

- Trabalhos apresentados e publicados nos anais do evento *XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, 2023, Alegrete, RS - Brasil.

- i. Título: Estimativa das trocas de CO₂ no Bioma Pampa: obtenção de parâmetros experimentais para uso em modelagem. Autores: Alecsander Mergen, Richard Reno da Costa Lobato, Vanessa de Souza Arruda, Maria Eduarda Oliveira Pinheiro, Cristiano Maboni, Tiago Bremm, Mateus da Silva Rebelo, **Michel Baptistella Stefanello**, Debora Regina Roberti.

- ii. Título: Partição da evapotranspiração em uma área de pastagem natural do Bioma Pampa brasileiro em Santa Maria – RS. Autores: Vanessa de Arruda Souza, Gustavo Pujol Veeck, **Michel Baptistella Stefanello**, Alecsander Mergen, Tiago Bremm, Anderson Ruhoff, Maria Eduarda O. Pinheiro e Debora R. Roberti.

Trabalho enviado para apresentação em congresso

- Resumo enviado para a *AGU Annual Meeting 2023*, San Francisco - EUA.

- i. Título: Influence of the ENSO phenomenon on carbon exchanges in the Brazilian Pampa biome. Autores: Debora Regina Roberti, Alecsander Mergen, Nicolas Alexander Katz, Richard Lobato, William Chaves, Vanessa De Arruda Souza, Maria Eduarda Oliveira Pinheiro, Tiago Bremm, **Michel Stefanello** and Cristiano Maboni.

Referências

- [1] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, S. B. C. Péan, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. Matthews, T. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Z. (eds.), “Climate change 2021: the physical science basis,” *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, vol. 2, 2021.
- [2] J. Garratt *et al.*, “The atmospheric boundary layer. cambridge atmospheric and space science series,” *Cambridge University Press, Cambridge*, vol. 416, p. 444, 1992.
- [3] J. C. Wyngaard, *Turbulence in the atmosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [4] R. B. Stull, *An introduction to boundary layer meteorology*, vol. 13. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1988.
- [5] J. M. Edwards, A. C. Beljaars, A. A. Holtslag, and A. P. Lock, “Representation of boundary-layer processes in numerical weather prediction and climate models,” *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 177, no. 2-3, pp. 511–539, 2020.
- [6] E.-M. Tastula, B. Galperin, S. Sukoriansky, A. Luhar, and P. Anderson, “The importance of surface layer parameterization in modeling of stable atmospheric boundary layers,” *Atmospheric Science Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 83–88, 2015.
- [7] O. Audouin, R. Roehrig, F. Couvreux, and D. Williamson, “Modeling the gabl4 strongly-stable boundary layer with a gcm turbulence parameterization: Parametric sensitivity or intrinsic limits?,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 13, no. 3, p. e2020MS002269, 2021.

- [8] S. Wang, M. Pan, Q. Mu, X. Shi, J. Mao, C. Brümmer, R. S. Jassal, P. Krishnan, J. Li, and T. A. Black, “Comparing evapotranspiration from eddy covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over canada,” *Journal of Hydrometeorology*, vol. 16, no. 4, pp. 1540–1560, 2015.
- [9] K. Paustian, J. Lehmann, S. Ogle, D. Reay, G. P. Robertson, and P. Smith, “Climate-smart soils,” *Nature*, vol. 532, no. 7597, pp. 49–57, 2016.
- [10] P. Smith, J.-F. Soussana, D. Angers, L. Schipper, C. Chenu, D. P. Rasse, N. H. Batjes, F. Van Egmond, S. McNeill, M. Kuhnert, *et al.*, “How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal,” *Global Change Biology*, vol. 26, no. 1, pp. 219–241, 2020.
- [11] D. D. Baldocchi, “Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future,” *Global change biology*, vol. 9, no. 4, pp. 479–492, 2003.
- [12] D. Baldocchi, “‘breathing’ of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems,” *Australian Journal of Botany*, vol. 56, no. 1, pp. 1–26, 2008.
- [13] W. Peters, A. van der Woude, I. Lujckx, E. Joetzjer, S. Lafont, B. Loubet, P.-H. Herig-Coimbra, D. Loustau, G. Koren, P. Ciais, *et al.*, “Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in europe,” 2023.
- [14] V. d. P. PILLAR, *Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade*. Ministério do Meio Ambiente, 2009.
- [15] M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, “Updated world map of the köppen-geiger climate classification,” *Hydrology and earth system sciences*, vol. 11, no. 5, pp. 1633–1644, 2007.
- [16] E. Veenendaal, O. Kolle, P. Leffelaar, A. Schrier-Uijl, J. Van Huissteden, J. Van Walsem, F. Möller, and F. Berendse, “Co₂ exchange and carbon balance in two grassland sites on eutrophic drained peat soils,” *Biogeosciences*, vol. 4, no. 6, pp. 1027–1040, 2007.
- [17] A.-K. Prescher, T. Grünwald, and C. Bernhofer, “Land use regulates carbon budgets in eastern germany: From nee to nbp,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 150, no. 7-8, pp. 1016–1025, 2010.
- [18] N. Gomez-Casanovas, N. J. DeLucia, C. J. Bernacchi, E. H. Boughton, J. P. Sparks, S. D. Chamberlain, and E. H. DeLucia, “Grazing alters net ecosystem c fluxes and the global warming potential of a subtropical pasture,” *Ecological Applications*, vol. 28, no. 2, pp. 557–572, 2018.
- [19] L. G. de la Motte, O. Mamadou, Y. Beckers, B. Bodson, B. Heinesch, and M. Aubinet, “Rotational and continuous grazing does not affect the total net ecosystem exchange of a pasture grazed by cattle but modifies co₂ exchange dynamics,” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 253, pp. 157–165, 2018.
- [20] S. Rutledge, A. Wall, P. Mudge, B. Troughton, D. Campbell, J. Pronger, C. Joshi, and L. Schipper, “The carbon balance of temperate grasslands part i: The impact of increased species diversity,” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 239, pp. 310–323, 2017.
- [21] R. Teague, F. Provenza, U. Kreuter, T. Steffens, and M. Barnes, “Multi-paddock grazing on rangelands: why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience?,” *Journal of Environmental management*, vol. 128, pp. 699–717, 2013.
- [22] R. Lal, “Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security,” *science*, vol. 304, no. 5677, pp. 1623–1627, 2004.
- [23] J.-F. Soussana, T. Tallec, and V. Blanfort, “Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands,” *Animal*, vol. 4, no. 3, pp. 334–350, 2010.

- [24] H. Vekuri, J.-P. Tuovinen, L. Kulmala, D. Papale, P. Kolari, M. Aurela, T. Laurila, J. Liski, and A. Lohila, "A widely-used eddy covariance gap-filling method creates systematic bias in carbon balance estimates," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 1720, 2023.
- [25] P. S. Arya, *Introduction to micrometeorology*, vol. 79. San Diego, California: Academic press, 2001.
- [26] E. K. Webb, G. I. Pearman, and R. Leuning, "Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 106, no. 447, pp. 85–100, 1980.
- [27] J. M. Wilczak, S. P. Oncley, and S. A. Stage, "Sonic anemometer tilt correction algorithms," *Boundary-layer meteorology*, vol. 99, pp. 127–150, 2001.
- [28] T. Nakai and K. Shimoyama, "Ultrasonic anemometer angle of attack errors under turbulent conditions," *Agricultural and forest meteorology*, vol. 162, pp. 14–26, 2012.
- [29] J. Moncrieff, R. Clement, J. Finnigan, and T. Meyers, "Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series," in *Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis*, pp. 7–31, Springer, 2004.
- [30] T. Foken, R. Leuning, S. R. Oncley, M. Mauder, and M. Aubinet, "Corrections and data quality control," *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*, pp. 85–131, 2012.
- [31] M. Reichstein, E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, *et al.*, "On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm," *Global Change Biology*, vol. 11, no. 9, pp. 1424–1439, 2005.
- [32] K. Wilson, A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, *et al.*, "Energy balance closure at fluxnet sites," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, no. 1-4, pp. 223–243, 2002.
- [33] T. E. Twine, W. Kustas, J. Norman, D. Cook, P. Houser, T. Meyers, J. Prueger, P. Starks, and M. Wesely, "Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland," *Agricultural and forest meteorology*, vol. 103, no. 3, pp. 279–300, 2000.
- [34] M. C. R. Alberto, R. Wassmann, T. Hirano, A. Miyata, R. Hatano, A. Kumar, A. Padre, and M. Amante, "Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the philippines," *Agricultural water management*, vol. 98, no. 9, pp. 1417–1430, 2011.
- [35] T. Foken, "The energy balance closure problem: an overview," *Ecological Applications*, vol. 18, no. 6, pp. 1351–1367, 2008.
- [36] G. C. D. Rubert, V. de Arruda Souza, T. Zimmer, G. P. Veeck, A. Mergen, T. Bremm, A. Ruhoff, L. G. G. de Gonçalves, and D. R. Roberti, "Patterns and controls of the latent and sensible heat fluxes in the brazilian pampa biome," *Atmosphere*, vol. 13, no. 1, p. 23, 2021.
- [37] G. P. Veeck, G. A. Dalmago, T. Bremm, L. Buligon, R. J. S. Jacques, J. M. Fernandes, A. Santi, P. R. Vargas, and D. R. Roberti, "Co2 flux in a wheat-soybean succession in subtropical brazil: A carbon sink," tech. rep., Wiley Online Library, 2022.
- [38] O. C. Acevedo, F. D. Costa, R. Maroneze, A. D. Carvalho, F. S. Puhales, and P. E. Oliveira, "External controls on the transition between stable boundary-layer turbulence regimes," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 147, no. 737, pp. 2335–2351, 2021.
- [39] M. Stefanello, D. Cava, U. Giostra, O. Acevedo, G. Degrazia, D. Anfossi, and L. Mortarini, "Influence of submeso motions on scalar oscillations and surface energy balance," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 727, pp. 889–903, 2020.

- [40] G. A. Degrazia, U. Rizza, M. Stefanello, S. Maldaner, D. R. Roberti, L. G. N. Martins, V. Anabor, F. S. Puhales, E. Dal Piva, O. C. Acevedo, *et al.*, “An overview of the micrometeorological field campaign at santa maria, southern brazil: the pampa-2016 experiment,” *Meteorological Applications*, vol. 25, no. 3, pp. 435–444, 2018.
- [41] L. Carvalho, G.-J. Duine, C. Jones, K. Zigner, C. Clements, H. Kane, C. Gore, G. Bell, B. Gamelin, D. Gomborg, *et al.*, “The sundowner winds experiment (swex) pilot study: Understanding downslope windstorms in the santa ynez mountains, santa barbara, california,” *Monthly Weather Review*, vol. 148, no. 4, pp. 1519–1539, 2020.

Tabela 10: Equipe do projeto

Nome	Função	Instituição	Descrição
Michel Stefanello	Coordenador e Pesquisador	UFSM	Processamento e interpretação de dados. Publicação de artigos científicos.
Gervásio Degrazia	Pesquisador	UFSM	Interpretação de dados e publicação de artigos científicos.
Otávio Costa Acevedo	Pesquisador	University of Oklahoma	Interpretação de dados e publicação de artigos científicos.
Ernani de Lima Nascimento	Pesquisador	UFSM	Interpretação de dados e publicação de artigos científicos.
Cinara Ewerling da Rosa	Pesquisador	IFFAR Campus SVS	Processamento e interpretação de dados. Publicação de artigos científicos.
Lidiane Buligon	Pesquisadora	UFSM	Análise dos dados. Publicação de artigos.
Fábio Rossi	Pesquisador	IFFAR Campus AL	Processamento e interpretação de dados. Publicação de artigos científicos.
Franciano Scremin Puhales	Pesquisador	UFSM	Análise dos dados. Publicação de artigos.
Daniel Caetano Santos	Técnico Meteorologia	UFSM	Análise e coleta dos dados.
Maria Eduarda Oliveira Pinheiro	Pós-doutoranda	UFSM	Análise dos dados. Publicação de artigos.
Vanessa de Arruda Souza	Pós-doutoranda	UFSM	Análise dos dados. Publicação de artigos.
Nathalie Tissot Boiaski	Pesquisadora	UFSM	Análise dos dados. Publicação de artigos.
Leila Maria Vespoli de Carvalho*	Pesquisadora	University of Santa Barbara	Interpretação dos resultados. Publicação de artigos.
Charles Jones*	Pesquisador	University of Santa Barbara	Interpretação dos resultados. Publicação de artigos.
Murilo Machado Lopes	Técnico Meteorologia	UFSM	Coleta dos dados. Manutenção dos sítios.
Eberton Cargnin De Souza	Mestranda Meteorologia	UFSM	Coleta dos dados. Manutenção dos sítios.
Richard Reno Da Costa Lobato	Doutorando Meteorologia	UFSM	Coleta e análise dos dados.
Luís Gustavo Nogueira Martins	Pós-doutorando	UFSM	Análise dos dados. Publicação de artigos.
Claudio Alberto Teichrieb	Pós-doutorando	UFSM	Manutenção e instalação das torres.
Cristiano Maboni	Pós-doutorando	UFSM	Processamento de dados.
Yoran Cherbonnie	Graduando Meteorologia	UFSM	Coleta dos dados e processamento.
Mateus Rebelo	Mestrado Meteorologia	UFSM	Coleta dos dados e processamento.
Guilherme Goergen	Pesquisador	UNIPAMPA - Bagé	Análise dos dados e processamento.

* Pesquisadores não foram incluídos no sigfapergs pois não conseguiram realizar o cadastro.