

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

Gustavo Pujol Veeck

**TROCAS DE ENERGIA E MASSA NO CULTIVO DE SOJA E TRIGO NO
SUL DO BRASIL**

Santa Maria, RS
2018

Gustavo Pujol Veeck

**TROCAS DE ENERGIA E MASSA NO CULTIVO DE SOJA E TRIGO NO SUL DO
BRASIL**

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

ORIENTADORA: Prof.^a Débora Regina Roberti

Santa Maria, RS
2018

Veeck, Gustavo
TROCAS DE ENERGIA E MASSA NO CULTIVO DE SOJA E TRIGO
NO SUL DO BRASIL / Gustavo Veeck.- 2018.
89 p.; 30 cm

Orientadora: Débora Regina Roberti
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Física, RS, 2018

1. Micrometeorologia 2. Fluxos superficiais I. Regina
Roberti, Débora 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.

©2018

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

Endereço: Rua Professor Heitor da Graça Fernandes , n. 713, apto 301

End. Eletr.: veeckgp@gmail.com

Gustavo Pujol Veeck

**TROCAS DE ENERGIA E MASSA NO CULTIVO DE SOJA E TRIGO NO SUL DO
BRASIL**

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

Aprovado em 6 de agosto de 2018:

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

Otávio Costa Acevedo, Dr. (UFSM)

Genei Antonio Dalmago, Dr. (Embrapa - Trigo)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avôs, meus pais, minha irmã e meu filho pelo apoio e incentivo. Agradeço à minha orientadora, professora Débora Regina Roberti, pela paciência, apoio e incentivo para realizar o trabalho.

À todos os profresses que de alguma forma contribuiriam para este trabalho.

Agradeço a todos os colegas e amigos do Lumet, pela ajuda, dicas e críticas.

À Embrapa-Trigo pelos dados para realizar este trabalho.

À capes pelo apoio financeiro.

RESUMO

TROCAS DE ENERGIA E MASSA NO CULTIVO DE SOJA E TRIGO NO SUL DO BRASIL

AUTOR: Gustavo Pujol Veeck
ORIENTADORA: Débora Regina Roberti

O Brasil é um dos maiores produtores de culturas agrícolas do mundo. Com isto, uma vasta área do território brasileiro é coberto por estas culturas que influenciam diretamente no balanço anual de carbono e nas trocas de vapor d'água entre a superfície terrestre e a atmosfera. Nesta interface, é fundamental entender como as trocas líquidas de CO₂, do inglês *Net Ecosystem Exchange (NEE)*, de água (evapotranspiração - ET) e de energia respondem às mudanças nas variáveis ambientais e biológicas e quais os mecanismos às controlam. Neste trabalho foram estudadas as relações entre as trocas de energia e massa entre a superfície e a atmosfera com as variáveis ambientais déficit de vapor de pressão (VPD), temperatura do ar (temp), umidade relativa (RH) e e radiação global incidente (Rg) em um sistema comercial de rotação de culturas, trigo no inverno e soja no verão, localizado no município de Carazinho no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Foi utilizada a técnica da covariância dos vórtices turbulentos, do inglês *Eddy Covariance (EC)* para calcular os fluxos atmosféricos, realizada a partição do NEE em produção primária bruta, do inglês *gross primary production (GPP)*, e a respiração do ecossistema (R_{eco}). A análise dos dados de fluxos de CO₂ utilizando o EC para o trigo e soja de sequeiro mostra que ambos comportaram-se como absorvedor de CO₂ sendo que o trigo, a partir 35° dia após a emergência, absorveu 287,61 g (C-CO₂) m⁻², enquanto a o ciclo completo da soja absorveu 209,20 g (C-CO₂) m⁻². A ET para o mesmo período do trigo foi de 279,19 mm e para a soja foi 428,15 mm. Foram caracterizadas as relações de histerese formadas entre o NEE e o fluxo de calor latente com as variáveis ambientais VPD, temp, RH e Rg para as diferentes fases das culturas. A forma e as áreas das histereses mostram como os fluxos ambientais variam no ciclo diário médio nas diferentes fases fenológicas das plantas. As áreas das histereses foram maiores para as fases de maior desenvolvimento das culturas, e em geral maiores para a soja. Os resultados aqui obtidos podem ser utilizados tanto para análise das simulações de modelos agrícolas e climáticos bem como, forçantes de inicialização destes.

Palavras-chave: Covariância dos vórtices turbulentos. NEE. Evapotranspiração. Histereses. Soja. Trigo.

ABSTRACT

MASS AND ENERGY EXCHANGE IN SOYBEAN AND WHEAT IN SOUTH OF THE BRAZIL

AUTHOR: Gustavo Pujol Veeck
ADVISOR: Débora Regina Roberti

Brazil is one of the largest agricultural producers in the world. With this, a vast area of Brazilian territory is covered by crops that directly influence the annual carbon balance and the exchange of water vapor between the Earth's surface and the atmosphere. It is fundamental to understand how the net exchanges of water and energy correspond to changes in environmental and biological variables and what mechanisms control them. In this work the relations between the energy and mass exchanges between the surface and the atmosphere were analyzed with the environmental variables of pressure vapor pressure (VPD), air temperature (temp), relative humidity (RH) and incident global radiation (Rg) in a commercial system of crop rotation, wheat in the winter and soybean in the summer, located in the municipality of Carazinho in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Gross primary production (GPP) was used to compute the atmospheric fluxes, the partitioning of the SEN into gross primary production (GPP), using the Eddy Covariance (EC) and respiration of the ecosystem R_{eco} . Analysis of the flux data of CO_2 using EC for wheat and rainfed soybeans shows that both behaved as an absorber of CO_2 and wheat, from 35 days after emergence, absorbed $287.61 (C-CO_2) m^{-2}$, while the complete cycle of soybean absorbed $209.20 g(C - CO_2) m^{-2}$. ET for the same period as wheat was 279.19 mm and for soy was 428.15 mm. The hysteresis relationships formed between the NEE and latent heat flux (LE) were characterized with the environmental variables VPD, temp, RH and Rg for the different phases of the crops. The shape and the areas of the hysteresis show how the environmental flows vary in the average daily cycle in the different phenological phases of the plants. Areas of the hysteresis were larger for the stages of higher crop development, and generally larger for soybean. The results obtained here can be used both for the analysis of the simulations of agricultural and climatic models as well as, forcing of initialization of these

Keywords: Eddy Covariance. NEE. Evapotranspiration. Hysteresis. Soybean. Wheat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação de vórtices sobre a superfície.	18
Figura 2.2 – Componentes do balanço de energia entre a superfície e atmosfera.	20
Figura 2.3 – Algoritmo proposto por (REICHSTEIN et al., 2005) para o preenchimento falhas no fluxo de CO ₂ (NEE).	28
Figura 3.1 – Localização do sítio experimental de Carazinho-RS.	36
Figura 3.2 – Estação micrometeorológica sob as culturas de Trigo e Soja no sítio ex- perimental de Carazinho-RS.	37
Figura 3.3 – Relação entre o fluxo líquido de CO ₂ (NEE) noturno e a velocidade de fricção (u*). Em círculos pretos são representadas as médias por faixa de u*. A linha pontilhada representa o filtro utilizado.	43
Figura 3.4 – Numero de falhas por hora para os fluxos turbulentos (NEE, H, LE) para os sítio de Carazinho-RS.	44
Figura 4.1 – Variáveis meteorológicas: Temperatura do ar, Radiação global incidente, RH, VPD e Precipitação. A área destacada em amarelo representa o trigo, e a verde a soja, para o sítio de Carazinho-RS.	47
Figura 4.2 – Normais climatológicas: Temperatura do ar, Precipitação. A área des- tacada em amarelo representa o trigo, e a verde a soja, para o sítio de Carazinho-RS.	47
Figura 4.3 – Rosa dos ventos para o sítio de Carazinho-RS.	48
Figura 4.4 – Índice de área foliar e matéria seca total para o trigo e soja para as respec- tivas fases de desenvolvimento (representadas pela sequência de cores azul (fase 1), verde (fase 2), rosa (fase 3), marron (fase 4) e azul claro (fase 5)) das plantas para o sítio de Carazinho-RS.	49
Figura 4.5 – Fluxos de calor sensível (a), calor latente (b), saldo de radiação (c) e calor do solo (d) para os sítio de Carazinho-RS. A área destacada em amarelo representa o trigo e em verde a soja.	50
Figura 4.6 – Fechamento do balanço de energia para o sítio de Carazinho-RS. A linha vermelha representa linha 1 por 1, e a linha preta a regressão linear.	51
Figura 4.7 – Fechamento do balanço de energia para o trigo (lado esquerdo) e soja (lado direito) para cada uma das fases de desenvolvimento das culturas para o sítio de Carazinho-RS. A linha vermelha representa o 1 por 1 e a linha preta a regressão linear.	52
Figura 4.8 – Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia (Rn, H, LE, G, H+LE+G) separados em diferentes fases de desenvolvimento das culturas para o sítio de Carazinho-RS.	54
Figura 4.9 – Média diária da razão de Bowen, H e LE para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o trigo e a verde a soja, a linha preta pontilhada o zero.	56
Figura 4.10 – Perfil vertical de temperatura entre os dias 02 e 14 de agosto de 2015 para o sítio de Carazinho-RS.	57
Figura 4.11 – Fluxos de calor sensível (a), calor latente (b), saldo de radiação (c) e calor do solo (d) entre os dias 02 e 14 de agosto de 2015 para os sítio de Carazinho-RS.	58
Figura 4.12 – Rosa dos ventos para o período entre os dias 02 e 14 de agosto de 2015 o sítio de Carazinho-RS.	58

Figura 4.13 – Partição do fluxo de CO ₂ líquido (NEE) em produção primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (R _{eco}) para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o período de cultivo do trigo e a verde o período de cultivo da soja.	60
Figura 4.14 – Partição do fluxo de CO ₂ acumulada (NEE) em produção primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (R _{eco}) para o trigo (a), soja (b) e para o período completo de estudo (c) para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o período da safra de trigo e a verde o período da safra de soja.	60
Figura 4.15 – Dispersão NEE diurno com a radiação PAR para o trigo. Em cores estão representados as diferentes fases de desenvolvimento do trigo. As linhas representam os ajustes lineares usando a equação (2.22). "α" representa a eficiência com que a luz é utilizada pelo dossel e "β" é a taxa máxima de CO ₂ absorvida pelo dossel na saturação da luz e "γ" é a R _{eco}	62
Figura 4.16 – Dispersão NEE diurno com Rg para o trigo. Em cores estão representados as diferentes fases de desenvolvimento da soja. As linhas representam os ajustes lineares usando a equação (2.22) "α" representa a eficiência com que a luz é utilizada pelo dossel "β" é a taxa máxima de CO ₂ absorvida pelo dossel na saturação da luz e "γ" é a R _{eco}	63
Figura 4.17 – Eficiência do uso da luz acumulado semanalmente para o sítio de Carazinho-RS.	64
Figura 4.18 – -a) Evapotranspiração real, evapotranspiração de referência e índice de área foliar. b) Evapotranspiração real, evapotranspiração de referência e precipitação acumulada para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o período do trigo e a verde a soja.	65
Figura 4.19 – Dispersão entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para o trigo e as 4 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase.	67
Figura 4.20 – Dispersão entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para a soja e as 5 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase.	68
Figura 4.21 – Relação de histerese dos ciclos diários médios entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para o trigo e a soja, e as respectivas fases de desenvolvimento das culturas. O NEE e as variáveis ambientais foram normalizados (valor máximo) para tornar possível a comparação entre elas. O "A" representa a área da histerese. Em azul é representado o ciclo completo.	69
Figura 4.22 – Ciclo diário médio do NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg, para o trigo e a soja.	70
Figura 4.23 – Dispersão entre o LE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para a soja e as 5 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase. Em azul é representado o ciclo completo.	72
Figura 4.24 – Dispersão entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para a soja e as 5 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase.	74
Figura 4.25 – Relação de histerese dos ciclos diários médios entre o LE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para o trigo e a soja, e	

as respectivas fases de desenvolvimento das culturas. O LE e as variáveis ambientais foram normalizados (valor máximo) para tornar possível a comparação entre elas. O "A" representa a área da histerese. Em azul é representado o ciclo completo. 75

Figura 4.26 – Ciclo diário médio do NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg, para o trigo e a soja. 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Trocas líquidas de carbono entre a superfície e atmosfera para a Trigo de inverno (TI) e trigo de primavera (TP) encontradas na literatura.	31
Tabela 2.2 – Trocas líquidas de carbono entre a superfície e atmosfera para a Soja encontradas na literatura.	34
Tabela 3.1 – Estádios fenológicos do trigo seguindo escala decimal de Zadoks, Chang e Konzak (1974).	40
Tabela 3.2 – Estádios fenológicos segundo escala de (FEHR; CAVINESS, 1977) (adaptado por (YORINORI, 1996).	41
Tabela 3.3 – Quantidade de dados removidos após controles de qualidade nos fluxos turbulentos.	44
Tabela 4.1 – Valores médios dos ciclos diários das componentes do balanço de energia (R_n , H, LE, G) e o resíduo do balanço de energia (Res) para o trigo e as respectivas fases de desenvolvimento das culturas (seção 3.2.1).....	53
Tabela 4.2 – Valores médios dos ciclos diários das componentes do balanço de energia (R_n , H, LE, G) e o resíduo do balanço de energia (Res) para a soja e as respectivas fases de desenvolvimento das culturas (seção 3.2.1).....	53
Tabela 4.3 – Coeficientes de ajuste (α, β, γ) da relação NEE-PAR usando a equação 2.22 para a safra de trigo em Carazinho-RS.	63
Tabela 4.4 – Coeficientes (α, β, γ) de ajuste da relação NEE-PAR usando a equação 2.22 para a safra de soja em Carazinho-RS.	64
Tabela 4.5 – Evapotranspiração acumulada em cada fase de desenvolvimento do trigo e da soja.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>FAO</i>	Organização das Nações Unidas para alimentação e agricultura
<i>CLA</i>	Camada Limite atmosférica
<i>GHG</i>	Gases do efeito estufa
<i>EC</i>	Covariância dos Vórtices
<i>NEE</i>	Fluxo líquido de CO ₂
<i>R_{eco}</i>	Respiração do ecossistema
<i>GPP</i>	Assimilação bruta de CO ₂
<i>ET</i>	Evapotranspiração
<i>ET₀</i>	Evapotranspiração de referência
<i>e_s</i>	Pressão de vapor de saturação
<i>e_a</i>	Pressão de vapor
Δ	Inclinação da curva de pressão de vapor
γ	Constante psicrométrica
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>C</i>	Carbono
<i>H₂O</i>	Água
<i>CH₄</i>	Metano
<i>NO₂</i>	Óxido nitroso
<i>LE</i>	Fluxo da calor sensível
<i>H</i>	Fluxo de calor latente
<i>G</i>	Fluxo de calor no solo
<i>R_n</i>	Saldo de radiação
<i>u[*]</i>	Velocidade de fricção
β	Razão de Bowen
<i>R_g</i>	Radiação solar incidente
<i>PAR</i>	Radiação fotossinteticamente ativa
<i>VPD</i>	Deficit de vapor de pressão

$temp$	Temperatura do Ar
u, v, w	Componentes da velocidade do vento
ρ_a	Densidade do ar
λ	Calor latente de evaporação
IAF	Índice de área foliar
MST	Matéria seca total
K	↓ Onda curta incidente
K	↑ Onda curta refletida
L	↓ Onda longa incidente
L	↑ Onda longa refletida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral	15
1.1.2	Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	CAMADA LIMITE PLANETÁRIA	17
2.2	TRANSPORTE TURBULENTO	17
2.3	COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS	18
2.4	BALANÇO DE ENERGIA	20
2.4.1	Efeito oásis	22
2.5	FLUXO DE CO ₂	22
2.6	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	25
2.6.1	Evapotranspiração de Referência	25
2.7	FOOTPRINT	26
2.8	PREENCHIMENTO DE FALHAS	27
2.8.1	Mean Diurnal Variation	27
2.8.2	Look-Up Table	28
2.9	HISTERESE	29
2.10	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	29
2.10.1	Trigo	29
2.10.2	Soja	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	DESCRIÇÃO DO SÍTIO EXPERIMENTAL	35
3.2	INSTRUMENTAÇÃO	36
3.2.1	Período de culturas	38
3.2.2	Índice de área foliar e matéria seca total	39
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS	42
3.4	FOOTPRINT	45
3.5	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	46
4.2	IAF E MST	48
4.3	FLUXOS DE ENERGIA	49
4.4	FLUXO DE CALOR SENSÍVEL NEGATIVO	56
4.5	PARTIÇÃO DO FLUXO DE CO ₂	59
4.6	RELAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO GLOBAL E A FOTOSSÍNTESE	61
4.7	BALANÇO DE ÁGUA	64
4.8	RELAÇÃO DO NEE COM AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	66
4.9	RELAÇÃO DO LE COM AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	71
5	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da concentração dos gases do efeito estufa (GHG, do inglês *green houses gases*) na atmosfera, atribuído principalmente as atividades antropogênicas (FAO, 2013), a comunidade científica tem buscado uma melhor compreensão das trocas destes gases nos diferentes ecossistemas. O grande volume de dados coletados nas últimas décadas permite análises com relação a variabilidade espacial e temporal que auxilia a compreender os processos biofísicos e a dinâmica destes gases, embora a lacuna de conhecimento ainda é grande devido a grande heterogeneidade dos ecossistemas (BALDOCCHI, 2014; BALDOCCHI; CHU; REICHSTEIN, 2018).

O método da covariância dos vórtices turbulentos, do inglês *Eddy Covariance (EC)*, é o método mais utilizado para medição *in situ* das trocas de GHG entre a superfície terrestre e a atmosfera, contando com redes internacionais de colaboradores (BALDOCCHI et al., 2001; CHU et al., 2017). Além das trocas de gases, trocas de energia também são possíveis de serem mensuradas com este método. Para tanto são utilizadas medidas de alta frequência (10-20Hz) das 3 componentes da direção do vento (u , v , w) e dos escalares de interesse (*Temperatura*, dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), metano (CH_4), entre outros) para estimativa dos fluxos turbulentos nesta interface. Ou seja, tais fluxos resultam da covariância da componente turbulenta da velocidade do vento com o escalar. Este método é idealizado para superfícies horizontalmente homogêneas.

Nas últimas décadas estudos usando o EC em biomas como florestas (HAVERD et al., 2007; AUBINET et al., 2010), pastagens naturais (TWINE et al., 2000; INCREASED... , 2005; MAUDER et al., 2018), pampa (LEWCZUK et al., 2017), e áreas agrícolas (MEYERS; HOLLINGER, 2004; FOKEN et al., 2010; ANTHONI et al., 2004), deserto (KOOL et al., 2014; SUN; SHAO; GAO, 2016), etc., tentam descrever os processos de trocas de energia e massa que ocorrem entre a superfície e a atmosfera. Existem ainda inúmeros estudos sobre estas trocas na agricultura. Por exemplo, análises dos fluxos de CO_2 por Anthoni et al. (2004) sobre o trigo de inverno na Alemanha, (VERMA et al., 2005) em milho sob plantio direto nos Estados Unidos, (BERNACCHI; HOLLINGER.; MEYERS, 2005) sobre rotação de milho/soja na França, (BAKER; GRIFFIS, 2005) em rotação milho e soja nos Estados Unidos, (JUN et al., 2006) em trigo no inverno e milho no verão na China, (DAVIS et al., 2010) em cevada e pousio na Irlanda, (GLENN et al., 2010) em milho/faba/trigo no Canadá, entre outros. Muitos destes estudos mostram a importância das práticas de manejo do solo para o ciclo do carbono, Bernacchi, Hollinger. e Meyers (2005) estima que a mudança do método de plantio convencional para o plantio direto, para o milho e soja, resultará em uma remoção de 20.77 Tg de carbono da atmosfera.

A área utilizada pela agricultura corresponde a cerca de 40% da superfície terrestre (5.0×10^9 ha), cerca de 30% destas áreas são terras aráveis e terras em cultivo perma-

nente (FAO, 2003). No sul do Brasil, mais especificamente no estado do Rio Grande do Sul (RS) as lavouras ocupam mais de nove milhões de hectares. Cerca de 90% dessa área é voltada à produção de grãos (cereais e oleaginosas), que configura a principal atividade agrícola do Estado (<https://www.fee.rs.gov.br/sinteseilustrada/caracteristicas-da-agropecuaria-do-rs/>). As principais culturas agrícolas do estado em termos de área plantada e quantidade produzida são soja com 15.000 mil toneladas, arroz com 9.000 mil toneladas, milho com 6.000 mil toneladas e trigo com 3.000 mil toneladas, dados da Fundação de Economia e Estatística do Rio Grande do Sul. O trigo é responsável por fornecer mais de 20% das calorias e proteínas para a população mundial (HAWKESFORD et al., 2013). A oferta anual de trigo para alimentação é de 65,43 kg/capita/ano e de soja é 1,52 kg/capita/ano(FAOSTAT). No mundo estima-se que 756,8 milhões de toneladas de trigo e 337,9 milhões de toneladas de soja foram colhidas em 2017 (<http://www.amis-outlook.org/>). Estes dois cultivos agrícolas tem uma importância histórica no estado do RS, pois tradicionalmente foram utilizadas em rotação, soja no verão e trigo no inverno, desde os anos 60. No entanto, as trocas de energia e massa, neste sistema, nesta região não foram ainda caracterizadas utilizando a metodologia EC. Este estudo pretende preencher esta lacuna.

As áreas agrícolas são um importante sumidouro de carbono (C) principalmente nas fases de crescimento da cultura (AUBINET et al., 2009; KUTSCH et al., 2010). No entanto parte deste carbono retorna para a atmosfera após o consumo dos grãos. Em geral a agricultura tem o potencial para reduzir a emissão de gases do efeito estufa e aumentar o estoque de carbono no solo (EAGLE et al., 2010). De acordo com a *Food and Agriculture Organisation (FAO)* os setores ligados a agricultura e pecuária foram responsáveis pela emissão de mais de 5,3 bilhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera no ano de 2011.

As flutuações nas concentrações de CO₂ na atmosfera são atribuídas a variabilidade interanual nas trocas líquidas de CO₂ entre a superfície e a atmosfera (QUÉRÉ et al., 2009). A variabilidade interanual é um fenômeno observado em muitos sítios ao redor do mundo (BALDOCCHI; CHU; REICHSTEIN, 2018; BALDOCCHI, 2008; SHAO et al., 2015). Entre as causas destas mudanças interanuais estão: mudanças no clima, processos fisiológicos, fenológicos, mudanças na estrutura dos ecossistemas, quantidade de nutrientes disponível para o ecossistema e possíveis distúrbios (HUI; LUO; KATUL, 2003; MARCOLLA et al., 2011; H. et al., 2008; RICHARDSON et al., ; BALDOCCHI; CHU; REICHSTEIN, 2018). Desta forma, caracterizar os impactos nos fluxos de CO₂ causados por variáveis climáticas e em processos fenológicos em áreas agrícolas é de grande importância pois podem afetar diretamente a variabilidade interanual do NEE.

A fotossíntese é mais sensível as variações das condições meteorológicas e ambientais do que a R_{eco} (FRANK et al., 2015). As diferenças interanuais nos fluxos de CO₂ são influenciadas pelas diferenças interanuais na quantidade de nuvens e precipitação pluvial, e seus impactos causados sobre as variáveis ambientais, tais como, temperatura do ar, radiação solar incidente na superfície (R_g), horas de luz, déficit de vapor de pressão (VPD),

umidade do solo (VANDIJK; DOLMAN; SCHULZE, 2005; LAW et al., 2002; YI et al., 2010). A combinação de nuvens, dias chuvosos, dias secos, dias de sol e umidade podem promover ou retardar a fotossíntese. Anos úmidos e chuvosos são geralmente associados a menor incidência de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês *Photosynthetically active radiation*), e em consequência ocorre redução da fotossíntese (ZERI et al., 2014). Anos mais secos são associados a maior incidência de PAR e ao aumento da fotossíntese, no entanto o déficit hídrico e a falta de água para as plantas, causa o fechamento dos estômatos reduzindo a fotossíntese (WOLF et al., 2016; REICHSTEIN et al., 2006). A resposta da fotossíntese às variações na temperatura do ar ocorre de forma quadrática e não linear (BALDOCCHI et al., 2001; WAY; YAMORI, 2014). A fotossíntese aumenta com conforme a temperatura do ar é elevada, no entanto com altas temperaturas são fatores limitantes para a fotossíntese. O desenvolvimento fenológico das plantas e por consequência a fotossíntese também é afetada pela temperatura ambiente (BALDOCCHI et al., 2005; RICHARDSON et al., 2010). Conforme Kramer, Leinonen e Loustau (2000) o desenvolvimento fenológico é geralmente associado a somas térmicas dos períodos. Gu et al. (2003) mostrou a relação entre o tempo de saída das folhas com o tempo de crescimento da cultura e o impacto na sazonalidade da fotossíntese.

As plantas e a respiração do solo tendem a ser influenciadas pela umidade do solo e pelas temperaturas do ar e do solo. Em condições ideais de umidade do solo a respiração é incrementada exponencialmente com a temperatura (ATKIN et al., 2005; XU; QI, 2008). Em condições de solo muito seco ou muito úmido a respiração do solo diminui.

O método EC também é utilizado para entender o ciclo hidrológico entre a superfície e a atmosfera na agricultura. A evapotranspiração (ET) é tipicamente o maior termo do balanço de água. Estima-se que o milho no seu maior desenvolvimento pode evapotranspirar até 37 mil litros de água por hectare por dia (SUYKER; VERMA, 2008), podendo influenciar no clima local e regional (SCHMUGGE; ANDRÉ, 1991). Em relação ao ciclo biogeoquímico, o uso de água pela planta afeta a evapotranspiração e é crítico para determinar o potencial do dossel para fotossintetizar CO_2 aumentando o IAF, desenvolvendo a produtividade. A relação entre a ET, a absorção de carbono e nutrição das plantas, determinam o NEE, GPP e o R_{eco} (SUYKER; VERMA, 2008).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Analisar a influência de variáveis ambientais nas trocas de energia e massa entre a superfície e a atmosfera numa rotação soja e trigo no Sul do Brasil.

1.1.2 Específicos

- Analisar a sazonalidade das componentes do balanço de energia.
- Quantificar as trocas de CO₂.
- Quantificar a evapotranspiração.
- Caracterizar os loops de histerese formados entre o NEE e LE com as variáveis ambientais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

A troposfera pode ser dividida em duas camadas principais: a atmosfera livre e a Camada limite atmosférica. A atmosfera livre é pouco influenciada diretamente pela superfície da Terra, nela o escoamento é predominantemente laminar e os processos de dispersão são dominados pela difusão molecular e o transporte é feito pelo vento médio. A camada limite planetária ou camada limite atmosférica (CLA), é definida como a parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra, e interage com forçantes superficiais de escala de tempo de aproximadamente uma hora. Essas forçantes podem ser forças de fricção, evaporação, transpiração, transferência de energia na forma de calor, emissão de poluentes, etc. A camada limite pode variar entre algumas centenas de metros até poucos quilômetros (STULL, 1988).

As variações de temperatura na CLA não são causadas diretamente pela radiação solar. Uma pequena parte desta radiação é absorvida na CLA, a maior parte da energia solar é absorvida pela superfície Terra. A superfície da Terra é aquecida ou resfriada em resposta à radiação solar incidente. Esta mudança de temperatura na superfície da Terra faz com que as parcelas de ar em contato com a superfície sejam aquecidas por processos turbulentos.

2.2 TRANSPORTE TURBULENTO

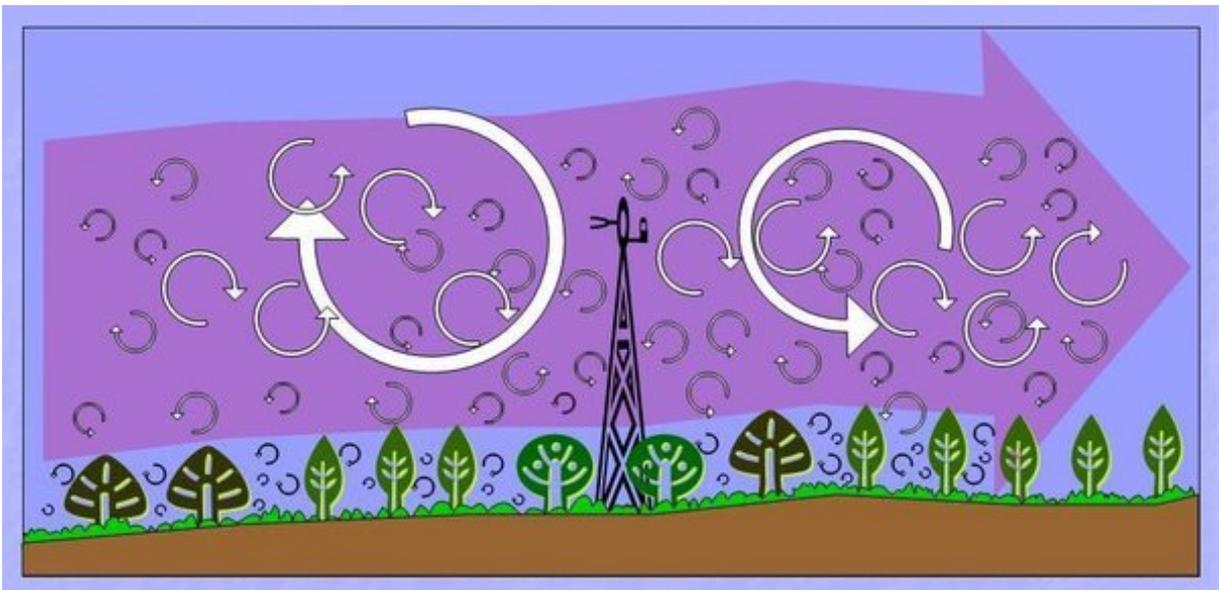
O transporte turbulento de escalares na atmosfera ocorre através de movimentos circulares irregulares chamados de vórtices (*do inglês eddies*), como mostra a figura 2.1. A turbulência é um processo que envolve vórtices de diferentes tamanhos sobrepostos. O tamanho dos vórtices pode variar desde alguns milímetros até turbilhões de 3000 metros de diâmetro (STULL, 1988). Os pequenos turbilhões não são eficientes no transporte de energia e escalares.

A turbulência na camada limite é gerada pelos forçantes atmosféricos. Por exemplo, a radiação solar aquece a superfície da Terra, a superfície aquece a camada de ar mais próxima do solo por condução. Esta camada de ar quente próxima da superfície sobe para camadas mais elevadas, e parcelas de ar mais frias, com maior densidade, descem para a superfície.

Durante o dia a turbulência é gerada por forçantes térmicos e mecânicos. Os for-

çantes térmicos são causados pelo aquecimento da superfície, e os forçantes mecânicos devido ao cisalhamento do vento pelo atrito com a superfície. Neste período os forçantes atuam na produção da turbulência. Nas horas mais quentes do dia a camada limite pode chegar a 2km de altura. Durante a noite ocorre a formação de uma camada de inversão térmica causada pelo resfriamento da superfície. Esta camada é caracterizada pela estabilidade com turbulência esporádica ou contínua. Essa camada atua suprimindo a turbulência, de modo que a camada limite atinge algumas centenas de metros, dependendo da magnitude dos forçantes térmicos e mecânicos.

Figura 2.1 – Representação de vórtices sobre a superfície.



Fonte: Burba e Anderson (2010).

2.3 COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS

O método EC é utilizado para estimar as trocas (fluxo) de gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2), o fluxo de momentum, calor sensível e calor latente (evapotranspiração) entre a superfície e a atmosfera (BURBA, 2013).

O fluxo é definido como uma quantidade de um escalar (CO_2 , H_2O (vapor d'água), temperatura do ar, entre outros) que passa por uma certa área em um determinado tempo. Desta forma o fluxo de uma certa quantidade é dado por:

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

onde $Q = \rho_Q / \rho_a$ é a razão de mistura do escalar Q , ρ_Q é a densidade do escalar "Q", ρ_a é a densidade do ar e w é a velocidade vertical do vento. Usando as médias de Rey-

nolds separamos os valores instantâneos em uma componente média e uma componente turbulenta.

$$\rho_a = \bar{\rho}_a + \rho'_a \quad (2.2)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.3)$$

$$Q = \bar{Q} + Q' \quad (2.4)$$

substituindo as equações (2.2) na equação (2.1), tem-se:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a + \rho'_a)(\bar{w} + w')(\bar{Q} + Q')}, \quad (2.5)$$

ou ainda, abrindo os termos do lado direito da equação:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{Q}) + (\bar{\rho}_a \bar{w} Q') + (\bar{\rho}_a w' \bar{Q}) + (\bar{\rho}_a w' Q') + (\rho'_a \bar{w} \bar{Q}) + (\rho'_a \bar{w} Q') + (\rho'_a w' \bar{Q}) + (\rho'_a w' Q')} \quad (2.6)$$

Das propriedades das médias de Reynolds, sabemos que as médias das componentes turbulentas é zero, desta forma a equação (2.6) pode ser escrita como:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{Q}) + (\bar{\rho}_a w' Q') + (\rho'_a \bar{w} Q') + (\rho'_a w' \bar{Q}) + (\rho'_a w' Q')}. \quad (2.7)$$

Assumindo que as flutuações na densidade do ar podem ser desconsideradas, logo:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{Q}) + (\bar{\rho}_a w' Q')} \quad (2.8)$$

ou ainda, considerando um terreno plano, em que a média da velocidade vertical é zero, desta forma a equação é reduzida para:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a w' Q')} \quad (2.9)$$

Desta forma um fluxo pela equação (2.9). Atualmente apenas os gases CO_2 , CH_4 , NO_2 são possíveis de serem medidos em alta frequência. Da mesma forma, o fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente podem ser escritos como:

$$H = \bar{\rho}_a C_p \overline{w' T'} \quad (2.10)$$

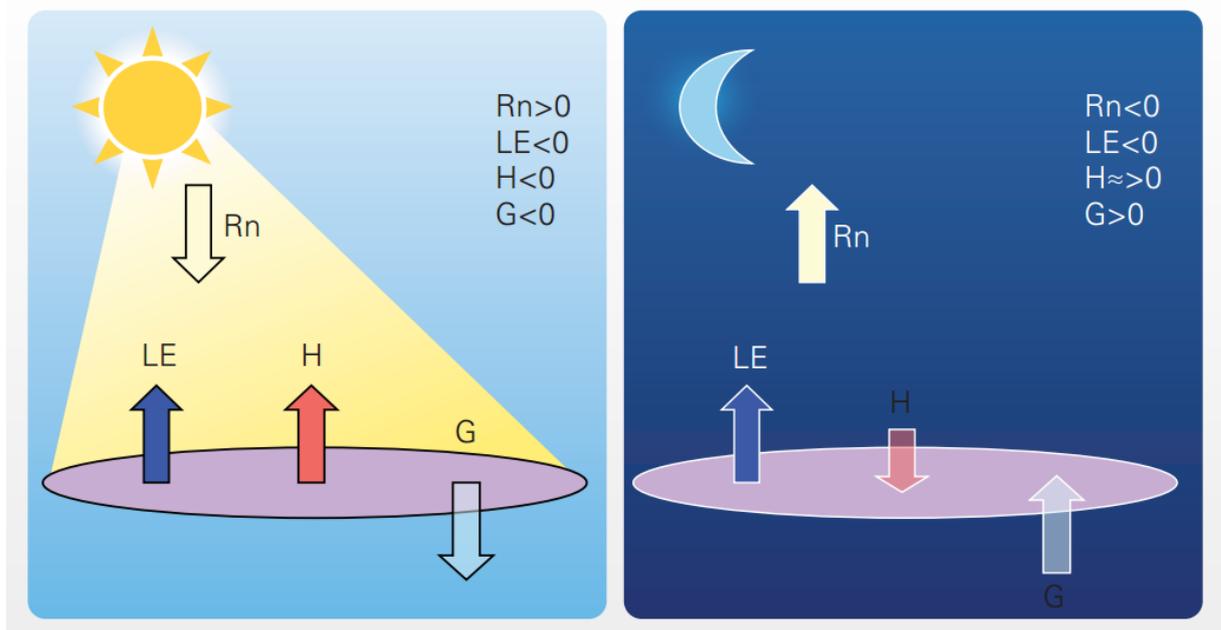
$$LE = \lambda \frac{M_w / M_a}{\bar{P}} \overline{\rho_p w' e'} \quad (2.11)$$

A equação (2.9) representam o fluxo turbulento para um escalar em um terreno plano e homogêneo, portanto um fluxo turbulento é dado pela covariância entre as flutuações turbulentas da velocidade vertical do vento e um escalar "Q".

2.4 BALANÇO DE ENERGIA

O balanço de energia entre a superfície e a atmosfera, mostrado na figura 2.2, é dado pelo balanço entre a energia disponível, saldo de radiação entre a superfície e a atmosfera (R_n , equação (2.13)) somada a energia utilizada para aquecer o subsolo G , com a energia utilizada aquecer a atmosfera (H) somada a energia utilizada para mudar o estado da água (LE):

Figura 2.2 – Componentes do balanço de energia entre a superfície e atmosfera.



Fonte: Adaptado de Burba e Anderson (2010).

$$H + LE = R_n + G \quad (2.12)$$

$$R_n = (K \downarrow - K \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow) \quad (2.13)$$

onde $K \downarrow$ é a radiação de onda curta incidente, $K \uparrow$ é a radiação de onda curta refletida, $L \downarrow$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera e $L \uparrow$ é a radiação de onda curta emitida pela superfície da terra. A equação (2.12) representa o balanço de energia, que é dado pela relação das componentes turbulentas (lado esquerdo) com a energia disponível (lado direito da igualdade).

Em geral, ao utilizar a técnica EC, não ocorre o fechamento do balanço de energia, ou seja, a energia de processos radiativos é maior do que a energia utilizada em processos turbulentos. Em geral esse resíduo de energia é de aproximadamente 20% (FOKEN, 2008a; FOKEN et al., 2010; WILSON et al., 2002).

Esta falha no fechamento do balanço de energia é atribuído a processos não re-

solvidos pela técnica EC (FOKEN, 2008a). Entre os fenômenos não resolvidos pelo EC estão a energia armazenada na vegetação. Para vegetação de pequeno porte Oncley et al. (2007) mostrou que a quantidade de energia armazenada no dossel é relativamente pequena. Rocha et al. (2004) encontrou para a região Amazônica valores entre 2 e 6 W m⁻² para esta energia em períodos diurnos. A energia armazenada no solo apresenta valores mais significativos, em regiões muito úmidas ou alagadas como áreas destinadas ao plantio de arroz, esta energia armazenada no solo pode ter a magnitude próxima ao fluxo de calor no solo (FOKEN, 2008a; TIMM et al., 2014).

Oncley et al. (2007) mostrou a dificuldade em obter experimentalmente o fechamento do balanço de energia com o EC. Estudos como os de Foken (2008a), Mauder e Foken (2006), Stoy et al. (2013) mostram que a heterogeneidade espacial, presente na grande escala (ordem de quilômetros), faz com que ocorra circulação de grande escala, estes vórtices de baixa frequência não são resolvidos pelo EC. Para isto é necessário fazer cálculos dos fluxos médios em áreas, além de fazer observações em diferentes pontos para obter a advecção gerada por vórtices de grande escala e realizar medidas de armazenamento de energia. Porém realizar este tipo de medida nem sempre é possível. Kaimal e Finnigan (1994), Mauder e Foken (2006) indicam a integração de fluxos em intervalos de tempo maiores do que 30 minutos podendo chegar a escalas diárias, para computar vórtices de baixa frequência. Porém para aplicação do EC é necessária uma estacionalidade temporal, mudanças nas condições sinóticas somadas a perda de resolução temporal na aplicação do EC dificultam a utilização da técnica.

Uma técnica muito utilizada para fazer este fechamento consiste na distribuição do resíduo do balanço de energia entre o H e o LE (TWINE et al., 2000; FOKEN, 2008a). Esta distribuição é feita utilizando a razão de Bowen (β) (BOWEN, 1926) na escala horária, assumida a condição de similaridade ente fluxos.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2.14)$$

Usando a equação (2.14), isolando os termos (H ou LE) substituindo na equação (2.12), desta forma encontramos as relações corrigidas para os fluxos de calor sensível e latente:

$$H^* = \frac{\beta (R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (2.15)$$

$$LE^* = \frac{(R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (2.16)$$

2.4.1 Efeito oásis

O efeito oásis é uma situação não clássica que ocorre na natureza. Este processo ocorre quando o ar da região é quente e seco, e na superfície há um "oásis" úmido e frio. Nestes circunstâncias ocorre forte evaporação da superfície úmida e das plantas, resultando em um calor latente frio que mantém a temperatura do ar amena. Dessa forma o fluxo de calor latente é positivo, no entanto, como a atmosfera é mais quente que a superfície, o fluxo de calor sensível é negativo. Nestes casos, o LE pode ser maior em magnitude que o Rn, porque a energia usada para a evaporação pode ser extraída do ar quente (STULL, 1988). Em condições desérticas onde não há água disponível para a evaporação, o fluxo de calor sensível é positivo e resulta em valores grandes da razão de Bowen. No entanto em regiões onde há água na superfície como em oásis, áreas agrícolas e regiões próximas a lagos e rios em que existe água disponível para evaporação, a energia proveniente da radiação é utilizada para a evaporação, e como a temperatura do ar é mais alta na atmosfera o fluxo de calor sensível é negativo tornando a razão de Bowen negativa (OKE, 1987).

2.5 FLUXO DE CO₂

O ciclo natural do carbono (C) envolve a absorção de CO₂ pelas plantas através da fotossíntese, a incorporação de C pelo solo, a emissão de CO₂ pela respiração de animais, plantas e microrganismos, e pela decomposição de matéria orgânica.

A assimilação de carbono pelas plantas ou GPP é determinado pela fotossíntese. A fotossíntese é um processo biológico que utiliza a energia solar para sintetizar compostos carbonados e liberar oxigênio. Estes processos ocorrem a partir do CO₂ e do H₂O por meio de reações de transduções na presença da luz e a consequente fixação do carbono, realizada pelo ciclo de Calvin, que apresenta diferenças entre as diferentes classes de plantas como C₃, C₄ e CAM (TAIZ; ZEIGER, 2006). A taxa de fotossíntese está diretamente relacionada com o PAR. As plantas tem a maior parte da absorção nas regiões do azul (430) e vermelho (660 nm). Neste espectro, cada acréscimo de radiação faz com que ocorra um aumento na taxa de fotossíntese. Quando todas as células estiverem excitadas, chegando ao ponto de saturação da luz, momento em que não há incremento de fotossíntese com o aumento da radiação solar. Fatores ambientais com a concentração do CO₂ e a temperatura do ar, e fatores indiretos como a umidade do ar, e umidade do solo que influenciam sobre o controle estomático são limitantes para a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2006; BUCKLEY, 2005).

A respiração é uma reação biológica mediada por enzimas que depende da temperatura e da disponibilidade de substratos.

Usando o EC podemos estimar a troca líquida de CO₂ (*NEE*). O *NEE* é dado pela soma das emissões de CO₂ através da respiração do ecossistema (respiração do solo, animais e plantas) (*R_{eco}*) e a absorção de CO₂ pela fotossíntese (*GPP*):

$$NEE = R_{eco} + GPP \quad (2.17)$$

Por convenção a *R_{eco}* é positiva e o *GPP* é negativo. Para a partição do *NEE* considera-se primeiramente os fluxos de CO₂ noturno. Como não há fotossíntese a noite, não há absorção de CO₂, então o *NEE* é igual a *R_{eco}*:

$$NEE = R_{eco} \quad (2.18)$$

Através de uma correlação com a temperatura do ar, pode-se calibrar diferentes equações que descrevem a *R_{eco}* e então extrapolar a *R_{eco}* para todo o dia (REICHSTEIN et al., 2005; REICHSTEIN et al., 2012).

Uma abordagem muito utilizada na estimativa da respiração do ecossistema é a chamada equação *Q₁₀*:

$$R_{eco} = R_{10} Q_{10} \frac{\theta - 10}{10}, \quad (2.19)$$

onde *R₁₀* é a respiração na temperatura de referência (10 °C) e *Q₁₀* é o parâmetro de sensibilidade que descreve a resposta da respiração a cada variação de 10 °C na temperatura do ar e *θ* é a temperatura do ar.

Outra abordagem para estimar a *R_{eco}* é utilizando o modelo empírico de Arrhenius. Reichstein et al. (2005) utiliza o modelo de regressão exponencial (LLOYD; TAYLOR, 1994):

$$R_{eco} = R_{ref} \exp \left\{ E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right) \right\}, \quad (2.20)$$

em que *R_{ref}* é a taxa de respiração a temperatura de referência $T_0 = -46.02^\circ C$, *E₀* é a energia de ativação, *T_{ref}* é a temperatura de referência e *T* é a temperatura do ar (LLOYD; TAYLOR, 1994).

Quando calibrados os parâmetros acima pode-se calcular a *R_{eco}* para o período diurno ($R_g > 20W m^{-2}$). Após isto pode-se estimar a *GPP* conforme a equação:

$$GPP = NEE - R_{eco} \quad (2.21)$$

O outro método utilizado para particionar o fluxo de CO₂ utiliza dados diurnos diminuindo assim os problemas sistemáticos que em geral subestimam o fluxo de CO₂ causados pela pouca turbulência noturna. Falge et al. (2001), Gilmanov et al. (2003), Lee et al. (1999) utilizam os efeitos da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e do déficit de pressão de vapor (VPD) sobre o *GPP* para descrever o *NEE*. Uma das funções mais simples

que descreve este fenômeno é uma função hiperbólica retangular (equação de Michaelis-Menten) cuja relação é dada por:

$$NEE = \frac{\alpha\beta PAR}{\alpha PAR + \beta} - \gamma \quad (2.22)$$

em que α é a eficiência com que a luz é utilizada pelo dossel e representa a inclinação inicial da curva de resposta a luz, β é a taxa máxima de CO₂ absorvido pelo dossel na saturação da luz e γ é o ponto de interceptação para o PAR igual a zero e representa a respiração do ecossistema. γ pode ser substituído pela equação (2.20) (LASSLOP et al., 2010)

Aubinet et al. (2001) utiliza o modelo de Mitscherlich:

$$NEE = \beta \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha PAR}{\beta}\right) \right) - \gamma \quad (2.23)$$

Gilmanov et al. (2003) apresenta uma relação entre o PAR e NEE através de uma hipérbole não retangular, adicionando à equação um grau de curvatura

$$NEE = -\frac{1}{2} \left(\alpha PAR + \beta - 1\sqrt{(\alpha PAR + \beta)^2 - 4\alpha\beta PAR} \right) - \gamma \quad (2.24)$$

Esta equação representa a melhor resposta do GPP a radiação solar, por ser uma equação não linear a convergência dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados não lineares é mais difícil.

O processo de controle estomático através do déficit de vapor de pressão (*VPD*):

$$\beta = \begin{cases} \beta_0 \exp(-k(VPD - VPD_0)), & VPD \leq VPD_0 \\ \beta_0, & VPD > VPD_0 \end{cases}$$

em que o valor de β é limitado exponencialmente por VPD_0 e por um parâmetro k , para os valores de VPD superiores a um limite mínimo. O valor de VPD_0 é definido como sendo 1kPa.

GOULDEN et al. (1996), Gu et al. (2005), Aubinet et al. (1999) mostram que o fluxo de CO₂ noturno é subestimado quando há pouca turbulência. Nestas condições a equação (2.17) é violada pois ocorre transporte através de processos de advecção vertical e horizontal (AUBINET et al., 2010; REBMANN et al., 2010; STAEBLER; FITZJARRALD, 2004). Nos períodos de estabilidade é usualmente utilizada a velocidade de fricção (u^*) como filtro (AUBINET et al., 2010; BARFORD et al., 2001; FALGE et al., 2001; PAPAIE et al., 2006; REICHSTEIN et al., 2005). Acevedo et al. (2009) propõem o uso do desvio

padrão da componente vertical da velocidade (σ_w) como filtro para remover os dados caracterizados pela estabilidade atmosférica, e ressalta que o u^* também é um fluxo e pode estar contaminado com movimentos de mesoescala o que não ocorre com o σ_w .

2.6 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A Evapotranspiração é o resultado de dois processos distintos que ocorrem simultaneamente, a evaporação e a transpiração. A evaporação é um processo físico que transfere água disponível na superfície (água contida nos poros do solo, da água interceptada pelo dossel e de águas represadas sobre o solo (DEOL et al., 2012)) para a atmosfera. Este processo depende da energia externa, do grau de saturação do ar, da velocidade do vento e da disponibilidade de água. Para que a mudança de estado da água (do estado líquido para o gasoso) ocorra através da absorção de energia na forma de calor, esta energia é chamada de calor latente de evaporação (λ). Chow, Maidment e Mays (1988) descreve a evaporação através da equação (2.25):

$$\lambda = 2,501 - 0,00237 \times T \quad (2.25)$$

em que T é a temperatura do ar em °C, λ é o calor latente de evaporação (MJ Kg^{-1}). O calor latente de evaporação pode ser considerado constante para muitas aplicações para temperaturas do ar entre 10 e 30 °C, com valor de $2,45 \times 10^6 \text{ JKg}^{-1}$.

A transpiração é um processo biofísico em que a água é absorvida do solo pelas raízes das plantas, transportada pelo xilema e liberada pela abertura dos estômatos (ALLEN et al., 1998; BUCKLEY, 2005). Este processo depende da condutividade hidráulica e potenciais hídricos da planta e do solo (BUCKLEY, 2005). Além disso, na interface folha-atmosfera a transpiração é governada pela demanda atmosférica, tendo um controle biológico por meio da condutância estomática (BUCKLEY, 2005; TAIZ; ZEIGER, 2006)

2.6.1 Evapotranspiração de Referência

A taxa de evaporação a partir de uma superfície de referência, sem deficit hídrico é chamada de evapotranspiração de referência (ET_0). A superfície de referência é dada por uma cultura de grama com características específicas, de solo, água e parâmetros biofísicos. A ET_0 é afetada exclusivamente por variáveis climáticas, desta forma pode ser calculada unicamente com variáveis meteorológicas.

A ET_0 é definida como a quantidade de água que seria utilizada por uma superfície vegetada com grama, entre 8 e 15 cm, com crescimento ativo, solo completamente co-

berto e sem déficit hídrico. O método recomendado para calcular a ET_0 é o FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Este método usa parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos da vegetação. Estes parâmetros são obtidos ajustando a equação:

$$ET_0 = \left(\frac{0,48\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{(\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2))} \right) \quad (2.26)$$

a ET_0 a evapotranspiração de referência dada em mm dia^{-1} , o Rn o saldo de radiação, G o fluxo de calor no solo, ambos dados em $(\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1})$, T a temperatura média do ar a dois metros, em $^{\circ}\text{C}$, u_2 a velocidade média do vento em m s^{-1} a dois metros de altura, e_s é a pressão de vapor de saturação e e_a a pressão de vapor, ambos dados em kPa , δ é a inclinação da curva de pressão de vapor de vapor e γ é a constante psicrométrica, ambas em $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

2.7 FOOTPRINT

O footprint é uma função matemática utilizada para estimar a localização da contribuição máxima ou relativa das fontes de escalares que influenciam nas medições de fluxos a uma determinada altura do sensor. As variáveis utilizadas para esta estimativa são geralmente: altura dos sensores, estabilidade atmosférica e rugosidade da superfície (KLJUN et al., 2004).

O pico de máxima contribuição (m) é dada por:

$$x_{pico} = X_{pico}^* h_m \left(\frac{\sigma_w}{u^*} \right)^{-0.8}, \quad (2.27)$$

$$X_{pico}^* = c - d, \quad (2.28)$$

e a distancia com contribuição relativa a $xx\%$ (metros) é dada por:

$$x_{xx\%} = X_{xx\%}^* h_m \left(\frac{\sigma_w}{u^*} \right), \quad (2.29)$$

$$X_{xx\%}^* = L'_{xx\%} \cdot c - d \quad (2.30)$$

A primeira equação nos da a informação da distancia em que há maior contribuição de fluxo. A segunda equação nos mostra a distância da contribuição relativa dos fluxos (entre 10 e 90%). Os parametros c e d são obtidos através da parametrização das equação 13 a 16 encontradas em Kljun et al. (2004). O valor de L' é tabelado para porcentagem entre 0 e 95% (KLJUN et al., 2004).

2.8 PREENCHIMENTO DE FALHAS

Dados atmosféricos de longos períodos geralmente contém falhas decorrentes de inúmeros problemas na obtenção deste, entre eles falta de energia, principalmente em estações remotas que dependem da energia solar, mau funcionamento de sensores, erros associados a condições meteorológicas, interferências de animais, erros humanos e falhas técnicas. Além destas falhas devemos ainda contabilizar dados espúrios que foram excluídos pelos filtros de controle de qualidade (VICKERS; MAHRT, 1997; FOKEN et al., 2005; FOKEN; WICHURA, 1996). Falge et al. (2001) mostrou que em média 35% dos dados de fluxos superficiais analisados são perdidos por falhas de sensores ou filtros de qualidade. Papale et al. (2006) estima que entre 20 e 60 % dos dados de fluxo são rejeitados em controles de qualidade.

Existem várias técnicas para fazer preenchimento dos dados de fluxo a fim possibilitar a integração temporal dos fluxos. As principais técnicas de preenchimento são o método de interpolação e autocorrelação dos fluxos como no caso do *Mean Diurnal Variation (MDV)*, o preenchimento utilizando o ciclo diurno médio de dias com características similares *LOOK-Up Table (LUT)*, o *Marginal Distribution Sampling (MDS)* e métodos conhecidos como *Artificial Neural Networks (ANNs)* que são puramente empíricos e utilizam regressões não lineares.

2.8.1 Mean Diurnal Variation

O MDV utiliza a autocorrelação temporal dos fluxos para realizar o preenchimento de falhas (FALGE et al., 2001). O preenchimento é realizado com valores médios dos dias subsequentes a falha, e é utilizado para falhas de +/- 1 hora (PAPALE, 2012). Falge et al. (2001) recomenda a utilização de janelas de até 2 semanas, pois utilizando longos períodos pode-se introduzir erros referentes a mudanças biológicas do sistema. Pode-se optar por utilizar o método para janelas fixas ou móveis. Com janelas fixas a posição da falha é independente da janela, já quando se utiliza janelas móveis, a janela é centrada na falha. O segundo método é o mais recomendado pois garante que a falha encontrada não esteja na borda da janela.

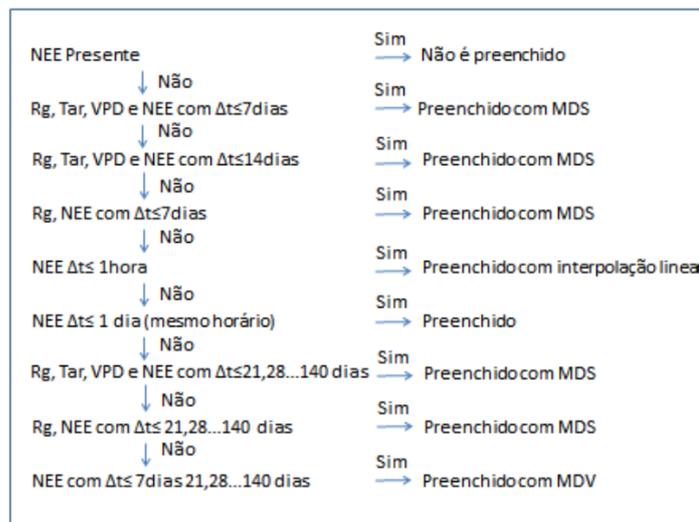
O MDV é um método estatístico que não utiliza forçantes atmosféricos e isso faz com que possa ser aplicada para o preenchimento de variáveis meteorológicas.

2.8.2 Look-Up Table

O LUT utiliza dias com condições meteorológicas similares ao dia com falhas. O preenchimento das falhas é feito com a média das observações obtidas com condições meteorológicas similares (PAPALE, 2012). O MDV é uma variação do LUT, esta técnica utiliza janelas de menor tamanho, porém com boa representatividade de fluxos, a técnica permite a utilização de janelas maiores a fim de que o espaço amostral de fluxos seja atingido (REICHSTEIN et al., 2005).

Reichstein et al. (2005) propõem uma rotina que utiliza o MDS e MDV para realizar o preenchimento de CO_2 . A rotina ilustrada na figura 2.3, encontra as falhas nos dados, cria uma janela de n dias centrada na lacuna, verifica as variáveis temperatura do ar (T_{ar}), R_g e VPD buscando dias dentro da janela com condições ambientais similares ao da falha. Caso encontre condições próximas o fluxo é preenchido por um valor médio dos fluxos sob estas condições. Não encontrando as condições ambientais similares ao dia com falha, o número de dias da janela é aumentado. Ainda pode-se reduzir as variáveis meteorológicas porém isto faz com que diminua a qualidade do preenchimento. Falhas de até uma hora são preenchidas usando interpolação linear. O último método de preenchimento utilizado pela rotina é o MDV, que utiliza janelas fixas que podem ser de até 140 dias. Convém ressaltar que a utilização de janelas grandes para o fechamento de dados em cultivos agrícolas que possuem grande variabilidade do fluxo em curto espaço de tempo, causados pelo desenvolvimento das plantas, pode acarretar erros expressivos (MOFFAT et al., 2007).

Figura 2.3 – Algoritmo proposto por (REICHSTEIN et al., 2005) para o preenchimento falhas no fluxo de CO_2 (NEE).



Fonte: Adaptado de Reichstein et al. (2005).

2.9 HISTERESE

A palavra histerese vem da palavra grega *hustéresis* e significa falta, necessidade, privação. Na ciência é definido como um fenômeno em que duas grandezas físicas mantêm uma relação de modo que a variação de uma delas depende do fato de a outra crescer ou decrescer relativamente a ela.

A análise de padrões de histerese geralmente é realizada por meio de um gráfico de dispersão entre duas variáveis para destacar as relações entre o estímulo (variável independente) e a resposta (variável dependente). Estas relações também podem ser descritas com índices e métricas que quantificam as três principais características das relações de histereses:

- Quanto a forma: pode ser linear, circular, ou em forma de oito
- Quanto a direção: sentido horário ou anti-horário
- Quanto ao tamanho do loop

Os índices quantitativos podem ser usados para comparar histereses em escalas de espaço e tempo, para desenvolver uma classificação de padrões de histereses, ou para testar a capacidade de modelos de reproduzir o comportamento histerético observado (ZUECCO et al., 2015)

2.10 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

O trigo e a soja são importantes fonte de alimento e renda no mundo. A FAO estima que a área plantada de trigo no mundo no ano de 2016 foi de 220 milhões de hectares, enquanto que a soja foi 121 milhões de hectares. Desta forma estas duas culturas tem uma forte influencia sobre os balanços de carbono, vapor d'água e trocas de energia entre a superfície e a atmosfera. Ao longo das ultimas décadas inúmeros estudos foram realizados buscando descrever estas interações e elucidar os processos biogeoquímicos. As próximas seções mostram uma breve revisão destes estudos.

2.10.1 Trigo

Em um sistema de rotação de culturas (cana de açúcar/trigo/batatas/trigo) na Bélgica, o NEE acumulado ao longo de 4 anos foi de $-1,59 \text{ kg } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$, mostrando que as culturas foram um sumidouro de carbono (AUBINET et al., 2009). Para o trigo na safra 2005 absorveu $-630 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$ enquanto a safra de 2007 no mesmo sítio absorveu

$-730 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$. Fica evidente a importância de estudos de longa duração pois a variabilidade interanual tem grande impacto sobre as culturas.

No noroeste da China no condado de Linzie em uma área de transição deserto-oásis, sob uma área de plantação de trigo irrigado Sun, Shao e Gao (2016) mostrou que o NEE foi de $-111.6 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$ na safra 2013 e $-142.2 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$ em 2014, no mesmo estudo o fechamento do balanço de energia foi de 70.5 e 72.7% respectivamente, e o EBR (razão do balanço de energia) foi 0,74 e 0,73.

Em Montana nos Estados Unidos, um estudo realizado com trigo de inverno (2013) seguido de pousio e trigo de primavera (2014) mostrou que nas duas safras o trigo comportou-se como sorvedouro de CO_2 , $-208 \pm 53 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$, $-107 \pm 29 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$, e durante o pousio a emissão foi de $135 \pm 73 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$. A evapotranspiração acumulada no mesmo período foi de $410 \pm 36 \text{ mm}$ para 2013 e $437 \pm 44 \text{ mm}$ na safra 2014 (VICK et al., 2016). No mesmo estudo o fechamento do balanço de energia para a safra de trigo de inverno foi 86%, para o trigo de primavera 105% e para o pousio 107%.

Em uma área de trigo de inverno em clima temperado, em Kirklareli na Turquia na safra 2012/13 o NEE foi de $-383.94 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$ (YESILKOY et al., 2017).

Na Alemanha sob um clima marítimo temperado, foi monitorada uma sequência de plantação de Trigo de inverno. Nos dois anos o NEE foi de $-270 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$, porém, houve significativa diferença na partição entre GPP e R_{eco} entre os anos. Essa diferença é atribuída a atividade biológica mais longa, compensada por uma forte respiração heterotrófica ocorrida no primeiro ano. Neste estudo o fechamento do balanço de energia representou 80% com erro quadrático médio igual a 0.9 (SCHMIDT et al., 2012).

No estado de Washinton nos Estados Unidos foram avaliados dois sítios a 130 km de distância, porém com diferenças significativas na média anual de precipitação pluvial, o sítio CAF-TD com média anual de 530mm e o sitio Lind com média anual de 247mm, ambos com clima semi-árido. O NEE acumulado para o trigo de inverno foi de $-517 \pm 26 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$ no sítio CAF-TD e $-524 \pm 29 \text{ g } (C - CO_2) \text{ m}^{-2}$ em Lind, porém o sítio Lind obteve menor produtividade devido ao déficit hídrico durante o período de crescimento (WALDO et al., 2016). Chi et al. (2016) obteve para o sítio CAF-TD 83% de fechamento do balanço de energia com $R^2 = 0,95$.

No estado de Oklahoma, Estados Unidos em um experimento de longa duração sob rotação de culturas sem irrigação, foram avaliados os balanços de carbono e água. A média anual de temperatura do ar e precipitação pluvial no local é de 15,6 °C e 857 mm respectivamente, nos 10 anos houve 7 safras com trigo. Na safra de 2002/03 a integração anual de NEE e ET foi $-125 \text{ g } C \text{ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e 327mm. Para 2003/04 $-179 \text{ g } C \text{ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e 621 mm. Para 2005/06 houve rotação trigo/soja com NEE anual $-120 \text{ g } C \text{ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e ET de 440 mm. Na safra 2009/10 para o trigo o NEE foi $-102 \text{ g } C \text{ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e o ET 477 mm. Para 2011/12 para o trigo/feijão-caupi o NEE foi $-254 \text{ g } C \text{ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e o ET 477mm (RAZ-YASEEF et al., 2015).

Tabela 2.1 – Trocas líquidas de carbono entre a superfície e atmosfera para a Trigo de inverno (TI) e trigo de primavera (TP) encontradas na literatura.

Local	Ano	NEE($gC\ m^{-2}$)	Fonte:
Bélgica	2005	-630	(AUBINET et al., 2009)
	2006	-730	
Linzie, China (irrigado)	2013	-116,3	(SUN; SHAO; GAO, 2016)
	2014	-142,2	
Montana, Estados Unidos (TI)	2013	-208 ± 53	(VICK et al., 2016)
Montana, Estados Unidos (TP)	2014	-107 ± 29	
Montana, Estados Unidos (TI)	2013	-383,94	(VICK et al., 2016)
Turquia (TI)	2012-2013	-383,94	(YESILKOY et al., 2017)
Changwu, China (TI)	2008-2009	-60 a -70 (anual)	(WANG; LIAO; GUO, 2013)
	2009-2010	-207 to -277	
Thuringia, Alemanha (TI)	2001	-185 a -245 (anual)	(ANTHONI et al., 2004)
Lamasquê, França (TI)	2005-2006	-304 a -402 (anual)	(BÉZIAT; CESCCHIA; DEDIEU, 2009)
Lonzée, Bélgica (TI)	2004-2009	-570 a -790 (anual)	(DUFRANNE et al., 2011)
Lonzée, Bélgica (TI)	2006	-630	(MOUREAUX et al., 2008)
Washington, Estados Unidos-CAF-NT (TI)	2012	-517 ± 26	(WALDO et al., 2016)
Washington, Estados Unidos-Lind	2013	-524 ± 29	
Alemanha	2007-2008	-270 ± 19	(SCHMIDT et al., 2012)
	2008-2009	-270 ± 18	
Oklahoma, Estados Unidos	2002-2003	-125 (anual)	(RAZ-YASEEF et al., 2015)
	2003-2004	-179 (anual)	
	2006-2007	-205 (anual)	
	2008-2009	-115 (anual)	
	2009-2010	-102 (anual)	
Luancheng, China	2008-2011	-392 (média)	(SHEN et al., 2013)
	2005-2009	-509(média)	

Shen et al. (2013) analisou dois sítios com rotação de culturas nas planícies da região norte da China, em Luancheng entre os anos de 2008 e 2011, o trigo de inverno em média absorveu $-392 \text{ g (C - CO}_2\text{) m}^{-2}$ e a ET foi 410mm, já em Weishan entre os anos de 2005 e 2009 em média o trigo de inverno absorveu $-509 \text{ g (C - CO}_2\text{) m}^{-2}$ e a ET foi 372mm. Neste estudo o fechamento do balanço de energia variou entre 84% 99%. Em estudo de longa duração no sitio Weishan flux na região central das planícies do norte da China, sob rotação de culturas geralmente trigo no inverno e milho no verão, em um clima sub-úmido seco (classificação (GROVE, 1999)), o fechamento do balanço de energia de junho de 2005 a dezembro de 2008 foi 74% com $R^2 = 0.83$. A evapotranspiração média em 9 anos de plantio de trigo de inverno foi de 368 mm (LEI; YANG, 2010; LEI et al., 2018). Em experimento realizado na estação Laucheng localizado no meio da planície de piemonte das Montanhas Taihang, Shijiazhuang, província de Hebei na China em uma área agrícola de alto rendimento, sob rotação de trigo no inverno e milho no verão, em uma região de semi-árido com média anual de precipitação pluvial de 480 mm, e evapotranspiração do trigo foi de 330 mm, com precipitação pluvial de 112 mm e irrigação de 220 mm (ZHANG et al., 2011).

2.10.2 Soja

Wagle et al. (2017) analisou dois sítios com soja, o primeiro irrigado apenas com a chuva em El Reno, no estado de Oklahoma, e o segundo com irrigação artificial em Stoneville, no estado do Mississippi. O estudo mostrou que a soja sem irrigação absorveu $131 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, enquanto a soja irrigada absorveu $325 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, com uma produtividade de $1,6 \text{ t ha}^{-1}$ e $4,9 \text{ t ha}^{-1}$ respectivamente, mostrando a importância da disponibilidade de água para o desenvolvimento da cultura.

Wagle, Xiao e Suyker (2015) mostra que existem diferenças entre a absorção de CO_2 da soja variando as técnicas de cultivo, plantio direto e plantio convencional, aliado a irrigação resultou em uma diferença de $37 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ e $264 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$. Em Buenos Aires, Argentina, sob o bioma Pampa o NEE da soja na safra do ano 2010/11 foi de $-254 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ enquanto que em 2011/12 o NEE foi $-220 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ no mesmo sítio.

Hollinger, Bernacchi e Meyers (2005) analisou 6 anos de dados em uma área na região norte dos Estados Unidos sob rotação de culturas (milho/soja), com plantio direto entre 1997 e 2002. O NEE acumulado nas 3 safras de soja foi $-97.5 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, entretanto, nas safras de 1998 e 2008 a soja comportou-se como fonte de CO_2 para atmosfera, $107,7 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ e $9,2 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, respectivamente. Na safra 2002 a soja foi um absorvedor CO_2 , com o NEE acumulado de $-210,4 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$. O acumulado de NEE nas 3 safras de milho foi $-14,3 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$. Hollinger, Bernacchi e Meyers (2005) resalta que o CO_2 sequestrado da atmosfera que vai para os grãos retorna para a atmosfera

completando o ciclo do C. É estimado que na média dos 6 anos a região central norte dos Estados Unidos foi responsável por remover 81,2 milhões de toneladas de C da atmosfera. Este estudo mostra que a longo prazo a agricultura é aliada para diminuir a emissão de carbono para atmosfera.

Em um sistema de rotação de culturas avaliado entre 2009 e 2013 em Illinois, nos Estados Unidos a soja no ano de 2010 foi uma fonte de carbono para a atmosfera, o NEE neste ano foi $107 \pm 19 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, em 2013 comportou-se como sumidouro de CO_2 , o NEE foi $-12 \pm 13 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ (LEWCZUK et al., 2017). Em Tottori, no Japão, região de clima marinho úmido e solo arenoso Şaylan et al. (2011) mostrou que o NEE em uma cultura de soja foi $-93 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, o fechamento do balanço de energia usando a razão dos fluxos turbulentos acumulados com os fluxos de energia disponível foi de 0,55.

Tabela 2.2 – Trocas líquidas de carbono entre a superfície e atmosfera para a Soja encontradas na literatura.

Local	Ano	NEE(g(C-CO ₂) m ⁻²)	Fonte:
Minnesota, Estados Unidos	2004	-37	(WAGLE; XIAO; SUYKER, 2015)
	2006	-59	
Nebrasca, Estados Unidos (irrigado)	2002	-48	(WAGLE; XIAO; SUYKER, 2015)
	2004	-141	
Illinois, Estados Unidos	2002	-127	(WAGLE; XIAO; SUYKER, 2015)
	2004	-264	
	2006	-167	
Oklahoma, Estados Unidos	2016	-54	(WAGLE et al., 2017)
Mississippi, Estados Unidos	2016	-296	(WAGLE et al., 2017)
Illinois, Estados Unidos(irrigado)	1998	103,7	(HOLLINGER; BERNACCHI; MEYERS, 2005)
	2000	9,2	
	2002	-127,2	
Nebrasca, Estados Unidos (irrigado)	2002-2008	-209 (média)	(WAGLE; XIAO; SUYKER, 2015)
	2002-2008	-170 (média)	
Buenos Aires, Argentina	2010-2011	-254	(LEWCZUK et al., 2017)
	2011-2012	-220	
Illinois, Estados Unidos	2010	107 ± 19	(LEWCZUK et al., 2017)
	2013	-12 ± 13	
Tottori, Japão	2005	-93	(ŞAYLAN et al., 2011)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO SÍTIO EXPERIMENTAL

Os experimentos de campo foram realizados na safra 2015/2016, em lavoura comercial de trigo no inverno e soja no verão, no município de Carazinho, RS (28°13'46"S, 52°54'32"W e 517m). O clima da região é Cfa segundo a classificação de Köppen (ALVARÉS et al., 2013) e o solo é um Latossolo Vermelho Aluminoférrico (STRECK et al., 2008). A área apresenta inclinação entre 5 e 10%, com exposição Leste/Nordeste. Na base inferior a área era circundada com mata nativa. No verão que antecedeu a semeadura do trigo a área foi cultivada com soja e após a soja foi cultivado nabo forrageiro antecedendo o trigo.

As semeaduras do trigo, cultivar BRS Parrudo e da soja, cultivar BMX Apolo foi realizada com semeadora adubadora, em sistema de plantio direto, em 09/06/2015 e 16/11/2015, respectivamente. A tabela 3.2 mostra os demais estádios fenológicos. A emergência das plantas de trigo ocorreu em 20/06/2015 e de soja em 24/11/2015, com início do espigamento do trigo em 01/09/2015 e do florescimento da soja em 15/01/2016, os demais estádios são mostrados na tabela 3.1. O encerramento do ciclo, com a colheita dos grãos ocorreu em 23/10/2015 e 24/03/2016 para o trigo e a soja, respectivamente. As sementes de ambas as culturas foram tratadas com fungicida e inseticida e as sementes de soja receberam inoculação com *Bradyrhizobium*.

Figura 3.1 – Localização do sítio experimental de Carazinho-RS.



Fonte: Google Earth.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

O monitoramento das variáveis ambientais/micrometeorológicas foi feito no centro da área experimental, cuja borda mínima foi superior a 250 metros. O mesmo foi realizado durante quatro ciclos de medida: para o período da cultura do trigo, intervalo entre a colheita do trigo e a semeadura da soja (Pousio trigo-soja), período da cultura da soja, e intervalo entre a cultura da soja e o início do cultivo do trigo (Pousio soja-trigo) da safra subsequente. No início do cultivo do trigo em 2015 foi instalado um sistema de coleta de dados Eddy Covariance, modelo EC150-SH-EB, composto com sensor analisador de H_2O e CO_2 aberto, integrado ao anemômetro sônico CSAT3 e barômetro avançado, marca Campbell Science Scientific, controlado por um datalogger, modelo CR1000, marca Campbell. Ao término de cada ciclo o sistema Eddy Covariance foi retirado para a colheita ou a semeadura das culturas agrícola, e retornou para o mesmo local. As figuras 3.2a e 3.2b mostram a estação micrometeorológica sob as culturas de trigo e soja respectivamente.

Próximo ao Sistema Eddy Covariance foi instalada uma torre meteorológica, com quatro níveis de medição de dados, em relação à superfície do solo: 50 cm, 100 cm, 200 cm e 400 cm. Em cada nível foi instalado um sensor de medição conjugada da temperatura e umidade relativa do ar, modelo HC2S3-L, marca Campbell e um anemômetro sônico bidirecional, modelo WINDSONIC1-L34, marca Campbell. Estes sensores foram conectados a um datalogger, modelo CR1000, marca Campbell, com leituras feitas a cada 30

Figura 3.2 – Estação micrometeorológica sob as culturas de Trigo e Soja no sítio experimental de Carazinho-RS.

(a) Estação micrometeorológica no período do Trigo. (b) Estação micrometeorológica no período da Soja.



segundos, com médias armazenadas a cada 15 minutos. Quando as plantas de trigo e soja atingiram os sensores instalados a 50 cm, a torre micrometeorológica foi erguida e os sensores do primeiro nível foram posicionados a 50 cm acima do dossel, onde permaneceram até o final dos períodos de medição. Para o trigo o reposicionamento foi feito em 15/09/2015 e para a soja em 05/01/2016. No ciclo de avaliação considerados como pousio, a torre permaneceu na mesma posição da sua instalação, ou seja, o primeiro conjunto de sensores ficou posicionado a 50 cm de altura da superfície do solo.

A 1,5 m de altura da superfície do solo, foram instalados sensores de para medição da radiação solar global incidente (R_g), precipitação pluvial (P) e saldo de radiação (R_n). Para a mediação da R_g foi utilizado um piranômetro, modelo SP-110-L-10, marca Apogee, em uma haste de metal. Sobre uma segunda haste de metal foi instalado um proviômetro, modelo TB4-L, marca Campbell, cuja superfície de captação da P ficou a 1,5 m de altura. Para a medição do R_n foram utilizados saldoradiômetros, modelo NR-LITE2-L, marca Campbell. Na cultura do trigo foram utilizados 2 saldoradiômetros, no pousio trigo-soja foram 2, na cultura da soja foram 4 e no pousio soja-trigo foram 2. As repetições foram distribuídas aleatoriamente na parte central da lavoura. Também foi medido o fluxo de calor no solo (G), com a utilização de sensores de placa de fluxo de calor no solo, modelos HPF01, marca Hukseflux. As placas de fluxo de calor no solo foram instaladas no solo a 1 cm de profundidade e cobertas com o mesmo solo retirado do local de sua instalação. Na cultura do trigo foram utilizadas 4 placas de fluxo de calor no solo, no pousio trigo-soja foram 2, na cultura da soja foram 8 e no pousio soja-trigo foram 4. As repetições foram distribuídas aleatoriamente na parte central da lavoura. Os sensores de R_g , P e R_n foram conectados a um datalogger modelo CR1000, marca Campbell, com leituras feitas a cada 30 segundos, com médias armazenadas a cada 15 minutos. Para a P as leituras e as armazenagens foram programadas para serem feitas a cada minuto. No caso do G , as placas de medição foram primeiro conectadas a um multiplexador de canais analógico,

modelo AM16/32, marca Campbell e o multiplexador foi conectado ao datalogger modelo CR1000.

A coleta dos dados foi realizada a cada semana e os mesmos foram armazenados em arquivos e organizados conforme cada ciclo de avaliação.

3.2.1 Período de culturas

O espaçamento entre linhas de plantas adotado para o trigo foi de 17 cm em e para a soja foi de 45 cm, com população final de 405 plantas m^{-2} e 27 plantas m^{-2} para trigo e soja, respectivamente. A adubação de base foi realizada conforme análise de solo e indicação de alto rendimento de grãos para ambas as culturas, com aplicação de 150 kg ha^{-1} de Fosfato Diamônico (DAP), da fórmula 18-46-00 para o trigo e 281 kg ha^{-1} de NPK, da fórmula 05-20-20 para a soja. Para o trigo foi realizada também a adubação de cobertura com 188 kg ha^{-1} de uréia, com 45% de nitrogênio, em duas aplicações: 02/07/2015 e 27/07/2015. Os demais tratamentos culturais foram realizados conforme indicações técnicas para o cultivo do trigo e soja, respectivamente.

Após a emergência das plantas, semanalmente foi realizada a amostragem aleatória na parte central das lavouras (trigo e soja) para acompanhamento do crescimento e desenvolvimento das plantas de ambas as culturas. Para o trigo foram coletadas 8 amostras de 0,5 m e para a soja foram coletadas 4 amostras de 1 m. As plantas de cada amostra foram cortadas rente ao solo, acondicionadas em embalagens plásticas e levadas para o laboratório de Plantas Daninhas da Embrapa Trigo, em Passo Fundo-RS, para determinação da área foliar e da participação da matéria seca.

Para melhor visualização dos dados o trigo foi subdividido em 4 fases. A primeira fase tem início em 01/07 (trigo já emergido) até o espigamento 01/09. A segunda fase teve início no espigamento e acabou no final do florescimento em 18/09, a terceira fase começou ao final do florescimento e terminou na maturação fisiológica. E a quarta fase ocorreu entre a maturação fisiológica e a colheita em 23/10.

A soja foi subdividida em 5 fases, a primeira fase teve início na emergência, no dia 14/11 e foi até o início do florescimento, dia 15/01. A fase 2 iniciou ao final do florescimento até o início da formação de grãos em 02/02. A fase 3 ocorreu entre o início da formação de grãos e o final do enchimento de grãos em 01/03. A quarta fase iniciou ao final do enchimento dos grãos e terminou com a maturação fisiológica em 14/10, e a fase 5 terminou na colheita em 24/03.

3.2.2 Índice de área foliar e matéria seca total

Devido ao grande volume de material vegetal, em laboratório foi feita uma subamostragem de plantas, de cada amostra, e separado somente as folhas, para a determinação da área foliar específica. Após a medição da área foliar destas folhas (AF

O restante do material vegetal das subamostras retornou para as devidas amostras e as mesmas foram separadas nos seguintes componentes: em folhas, colmo, espiga e grãos, no caso do trigo e em folhas, caule, vagens e grãos, no caso da soja, quando todos os órgãos estavam presentes. Cada componente foi acondicionado em embalagem de papel e juntamente com o material vegetal para determinação da MS_m foram colocados para secagem em estufa própria para secagem de material vegetal, regulada para atingir temperatura do ar máxima de 65°C e com fluxo de ar quente constante. A matéria seca total (MST), em cada data de coleta foi obtida pela soma da matéria seca de todos os componentes.

Com a matéria seca de folhas (MSF, g) e a AF_e ($cm^2 g^{-1}$) determinadas foi estimado o índice de área foliar (IAF), pela equação:

$$IAF = \frac{MSF * AF_e}{AS}$$

em que, AS é a área de solo ocupada pelas plantas, no caso, 850 cm^2 para o trigo e 4.500 cm^2 para a soja. O IAF é conhecido como um índice, mas, fisicamente, representa área de folha por área de solo (cm^2 de folha / cm^2 de solo).

Em todas as amostragens de plantas, ao mesmo tempo que foram realizadas as coletas foi determinada a altura do dossel. A mesma foi medida do nível do solo até o ponto máximo do dossel. Foram feitas 20 repetições aleatórias, na parte central da lavoura e próximo aos pontos de amostragem de plantas. Durante todo o ciclo de crescimento e desenvolvimento das plantas foram realizadas avaliações dos principais estádios fenológicos, sendo cada estágio considerado quando 50% das plantas apresentavam o referido estágio. Para o trigo foi utilizada a escala de Zadoks, Chang e Konzak (1974) e para a soja aquela de Fehr e Caviness (1977) adaptada por Yorinori (1996). Os estádios fenológicos de ambas as culturas são mostras nas tabelas 3.2 e 3.1.

Tabela 3.1 – Estádios fenológicos do trigo seguindo escala decimal de Zadoks, Chang e Konzak (1974).

Data	Estádio	Observações
20/06/2015	10	1ª folha fora do coleóptilo.
33/06/2015	12	2ª folha desenrolada.
01/07/2015	13	3ª folha desenrolada.
10/07/2015	20	1º afilho em início de desenvolvimento.
16/07/2015	20	Afilhamento: 1º afilho bem desenvolvido em N e primórdios do 2º afilho saindo do colmo em N+.
23/07/2015	21	Afilhamento: 21 = afilho principal + 1 afilho.
30/07/2015	22	Afilhamento: 22 = afilho principal + 2 afilhos.
04/08/2015	31	Alongamento do colmo: 31 = 1º nó detectável.
11/08/2015	32	Alongamento do colmo: 32 = 2º nó visível 33 = 3º nó visível.
18/08/2015	40	Emborrachamento: 40 = início emborrachamento 41 = bainha da folha bandeira se estendendo.
25/08/2015	45	Emborrachamento: 45 = emborrachamento 41 = bainha da folha bandeira abrindo.
01/09/2015	51	Espigamento: 51 = primeiras espiguetas visíveis 53 = 1/4 da espiga visível
08/09/2015	61	Florescimento: 61 = início florescimento.
15/09/2015	69	Florescimento: 69 = final florescimento (grão ainda não começou a encher).
22/09/2015	71	Grão Leitoso: 71 = grão com pouca água (início do enchimento de grãos).
29/09/2015	77	Grão Leitoso: 77 = grão com muito leite (enchimento de grãos).
06/10/2015	80	Grão Pastoso.
14/10/2015	90	Maturação (maturação fisiológica).
23/10/2015	90	Maturação (maturação colheita).

Tabela 3.2 – Estádios fenológicos segundo escala de (FEHR; CAVINESS, 1977) (adaptado por (YORINORI, 1996).

Data	Estádio	Observações
24/11/2015	VE	Emergência
03/12/2015	V1	Primeiro trifólio aberto
09/12/2015	V3	Segundo trifólio expandido e terceiro trifólio aberto.
15/12/2015	V4	Terceiro trifólio expandido e quarto trifólio aberto.
22/12/2015	V7	Sexto trifólio expandido e sétimo trifólio aberto na haste principal (início das ramificações).
29/12/2015	V9	Oitavo trifólio expandido e nono trifólio aberto na haste principal.
05/01/2016	V11	Décimo trifólio expandido e décimo primeiro trifólio aberto na haste principal.
12/01/2016	V12	Décimo primeiro trifólio expandido e décimo segundo trifólio aberto na haste principal.
19/01/2016	R2	Florescimento pleno (haste principal com a maioria das inflorescências abertas).
26/01/2016	R3	Início da frutificação (vagens com 0,5 a 1,5cm de comprimento no terço superior).
02/02/2016	R5.1	Início da formação da formação dos grãos (pequeno sinal dos grãos).
09/2/2016	R5.2	Maioria das vagens no terço superior da haste entre 10 e 25% da granação máxima.
16/02/2016	R5.3	Média granação das vagens do terço superior (entre 25 e 50% da granação máxima).
23/02/2016	R5.4	Maioria das vagens no terço superior da haste principal com 50 e 75% da granação máxima.
01/03/2016	R5.5	Maioria das vagens no terço superior da haste principal com 75 e 100% da granação máxima.
08/03/2016	R6	"Vagem Gorda": 100% da granação máxima e maioria das folhas das plantas ainda verdes.
15/03/2016	R7.1	Primeiro estágio que compreende a maturidade fisiológica: início até 50% das folhas e vagens amarelas.
22/03/2016	R8.2	Acima de 50% de desfolha. Próximo ao ponto de colheita.
24/03/2016	R9	Maturação de colheita.

Na colheita do trigo e da soja foram realizadas amostragens para a determinação do rendimento de grãos e de componentes do rendimento de grãos. Para o trigo foram

coletadas 8 repetições aleatórias de 10 m lineares, equivalendo a 1,7 m² e para a soja foram coletadas 4 repetições aleatórias de 10 m lineares, equivalendo a 4, m². As amostras foram trazidas para o laboratório e os grãos foram trilhados com máquina de trilha estacionária para grãos. Após foi determinado a massa de grãos, com balança de precisão e foi determinada a umidade dos grãos. No caso do trigo foi determinado também, o peso de hectolitro. Os componentes do rendimento de grãos determinados foi o peso de mil grãos para o trigo e o número de legumes por planta, número de grãos por legumes e peso de mil grãos, no caso da soja.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados de alta frequência (10Hz), de concentração de CO₂ e H₂O medidos usando um analisador de gás infravermelho, do inglês *infrared gas analyzer (IRGA)*, de caminho aberto, modelo EC150 da Campbell Scientific, e das 3 componentes do vento (u,v e w) e temperatura virtual medidos usando um anemômetro sônico, modelo CSAT3 da Campbell Scientific foram processados usando o software EddyPro[®], versão 6.2.1, da LiCOR. O EddyPro[®] é um software que aplica a técnica EC para calcular fluxos de massa (NEE), energia (H, LE) e momentum na superfície, armazenamento de gases e energia, temperatura, umidade e densidade do ar, VPD, parâmetros estatísticos como variância e estimativas de erros, espectros e co-espectros de turbulência, footprint e parâmetros micrometeorológicos.

Os fluxos foram calculados usando média em bloco de 30 minutos, com rotação dupla (WILCZAK; ONCLEY; STAGE, 2001), correções para efeitos de densidade (WEBB; PEARMAN; LEUNING,), atenuação de fluxo devido à configuração instrumental (GASH; CULF, 1996). Correções devido a filtros de passa alta (MONCRIEFF et al., 1997), e passa baixa (MONCRIEFF et al., 2005). Filtragem de dados de alta frequência (VICKERS; MAHRT, 1997) e estimativas de incertezas (FINKELSTEIN; SIMS, 2001).

Após calcular os fluxos os dados foram submetidos a um controle de qualidade para remoção de valores não físicos (FOKEN et al., 2012). Primeiramente foi utilizado um filtro de limites superior e inferior. Os limites foram: para o NEE, $20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} < \text{NEE} < -60 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para o LE, $650 \text{ W m}^{-2} < \text{LE} < -80 \text{ W m}^{-2}$, para o H, $800 \text{ W m}^{-2} < \text{H} < -100 \text{ W m}^{-2}$. O controle de qualidade (FOKEN et al., 2005) onde são removidos os fluxos com *flag* igual a 2. Os flags são diagnósticos que indicam a qualidade do fluxo, 0 para muito bom, 1 pra bom, e 2 para ruim. O último controle compara dados de cada meia hora (fi) com a média (fmi) e o desvio padrão (fsdi) dos mesmos horários em uma janela móvel de 14 dias em torno da meia hora fi, seguindo as equações adaptadas de (BÉZIAT;

CESCHIA; DEDIEU, 2009):

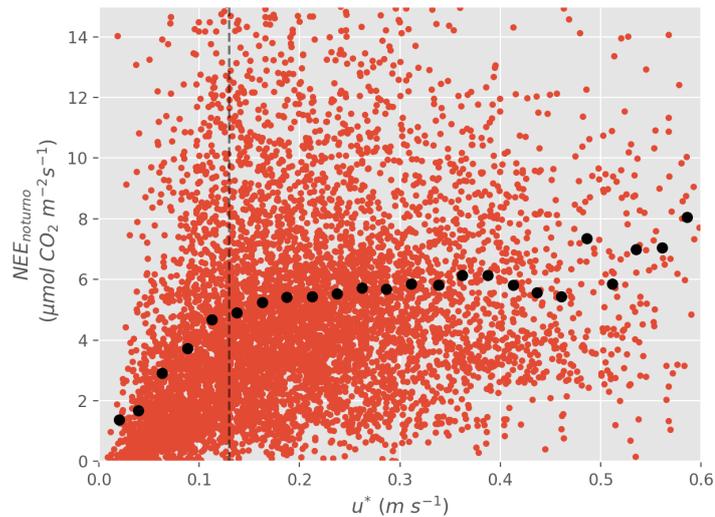
$$f_i < f_m - (1.7 * f_{fsd}) \quad (3.1)$$

e

$$f_i > f_m + (1.7 * f_{fsd}) \quad (3.2)$$

O parâmetro turbulento escolhido para filtrar os dados em condições de estabilidade atmosférica foi a velocidade de fricção. Foram removidos os fluxos de CO₂ em períodos associados a pouca turbulência ($u^* < 0.13 \text{ m s}^{-1}$), nestes períodos de estabilidade atmosférica o método EC falha. Valores de u^* acima de $0,6 \text{ m s}^{-1}$ foram associados a picos, do inglês *spikes* e removidos. Desta forma o filtro utilizado para remoção de dados de NEE foi: $0.6 \text{ m s}^{-1} < u^* < 0.13 \text{ m s}^{-1}$. A figura 3.3 mostra o fluxo de CO₂ noturno pelo u^* . A linha pontilhada representa o limite em que o fluxo de CO₂ passa a não depender da turbulência, desta forma valores abaixo da linha foram removidos.

Figura 3.3 – Relação entre o fluxo líquido de CO₂ (NEE) noturno e a velocidade de fricção (u^*). Em círculos pretos são representadas as médias por faixa de u^* . A linha pontilhada representa o filtro utilizado.



Fonte: Autor.

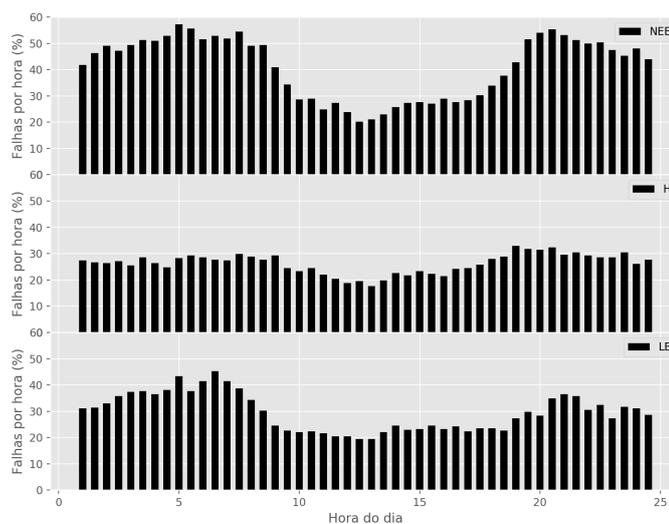
Apos aplicar os controles de qualidade nos dados de fluxo, a quantidade total de falhas representou 42,95%, 27,51% e 30,90% dos dados de fluxo de CO₂, H e LE respectivamente. Estes valores estão de acordo com a literatura (PAPALE et al., 2006). A tabela 3.3 mostra a quantidade de dados percentuais removidos após aplicar cada um dos filtros de controle de qualidade.

Tabela 3.3 – Quantidade de dados removidos após controles de qualidade nos fluxos turbulentos.

filtro	CO ₂	H	LE
nº de falhas inicial	4,81%	1,03%	6,35%
limite superior	2,46%	0,02%	0,14%
limite inferior	0,67%	1,58%	1,79%
Precipitação	4,58%	5,30%	4,27%
controle (FOKEN et al., 2005)	4,40%	6,08%	9%
Controle (BéZIAT; CESCHIA; DEDIEU, 2009)	7,03%	13,51%	9,37%
Velocidade de fricção(<0,13 m s ⁻¹ e >0,6 m s ⁻¹)	19%	—	—
Total de falhas	42,95%	27,51%	30,90%
% de falhas noturnas (Rg<10)	63,68%	58,83%	64,10%

A quantidade de falhas no NEE, LE e H por hora é mostrada na figura 3.4. O período noturno têm maior quantidade de falhas nos três casos. O horário com maior incidência de falhas para o NEE foi as 4 horas, associado principalmente a estabilidade atmosférica, totalizando 55% de falhas neste horário. As falhas noturnas do NEE representaram 63,68% do total das falhas. Para o H o maior número de falhas ocorreu as 18 horas, com 31,7% falhas contabilizadas, com 58,83% de falhas noturnas. O LE contabilizou 144 falhas as 5 horas e 30 minutos, sendo 64,10% das falhas no período noturno.

Figura 3.4 – Numero de falhas por hora para os fluxos turbulentos (NEE, H, LE) para os sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

3.4 FOOTPRINT

A contribuição do footprint de até 70% foi em média a uma distância de 177 m, sendo a contribuição máxima ocorrida a 39 m da torre. Em 12,3% dos eventos na média horária a contribuição de até 70% veio de fora da área de estudo (distância maior que 260m). A distância de maior contribuição, em média foi de 39 m. Não foram removidos dados utilizando o footprint.

3.5 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

O Coeficiente de correlação é utilizado para medir o grau de associação da relação linear entre duas variáveis, e é definido como:

$$R = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (3.3)$$

onde

$$S_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} = \frac{\sum y_i - n\bar{x}\bar{y}}{n - 1} \quad (3.4)$$

em que \bar{x} , \bar{y} , s_x , s_y representam as médias e o desvio padrão das variáveis x e y.

A equação 3.4 resulta em um número entre 0 e ± 1 . R=0 indica que não há associação, R= ± 1 indica forte correlação. Neste trabalho os coeficientes de correlação foram classificados como:

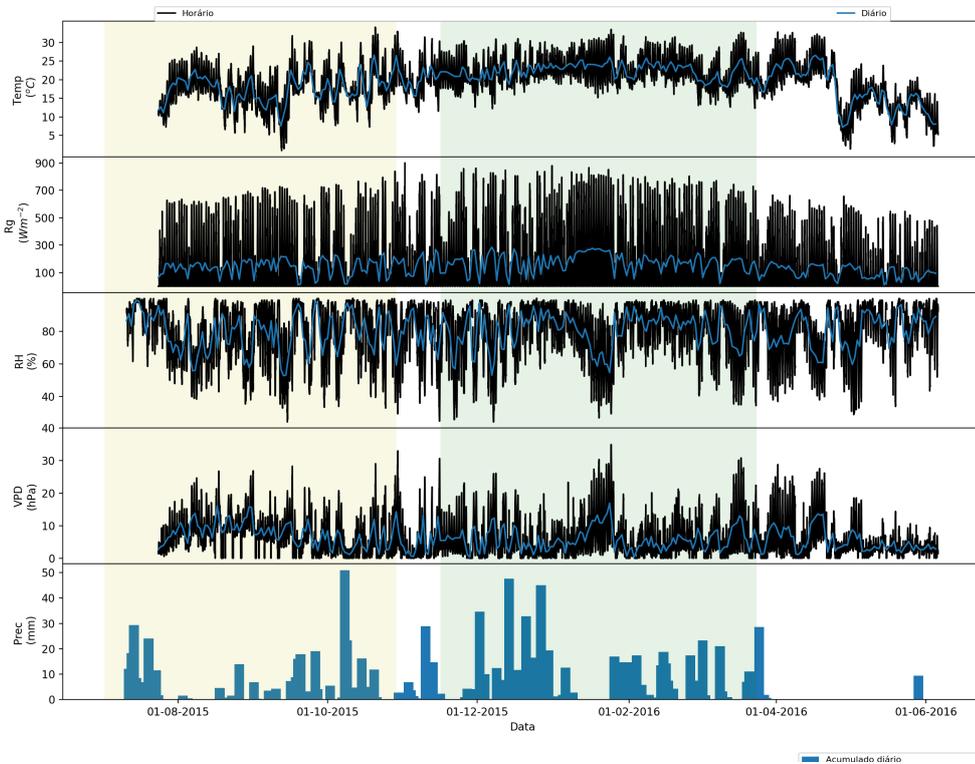
Valor de R (+ ou -)	Classificação
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,2 a 0,39	Correlação fraca
0,4 a 0,59	Correlação moderada
0,6 a 0,79	Correlação forte
0,80 a 1	Correlação muito forte

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

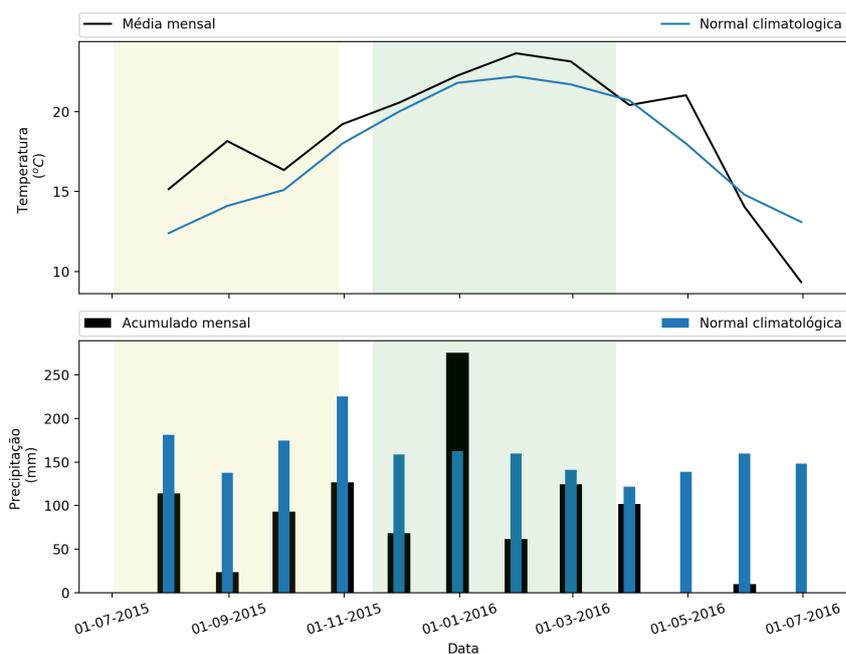
As variáveis meteorológicas e as normais climatológicas para o sítio experimental de Carazinho são mostradas nas figuras 4.1 e 4.2. O período destacado em amarelo representa a safra de trigo de 2015 e em verde a safra de soja 2015-16. As maiores temperaturas do ar (médias diárias) foram registradas no período do verão, embora dias esporádicos apresentaram altas temperaturas também na primavera e outono. A maior temperatura horária registrada foi no dia 20 de outubro de 2015 com valor de $34.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto a menor foi de $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ em 12 de setembro do mesmo ano. As médias mensais da temperatura ficaram acima da normal climatológica. A maior diferença ocorreu em agosto de 2015. A média mensal para este mês foi de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que a normal climatológica é de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. O mês de maio de 2016 a temperatura normal foi maior ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) do que a temperatura registrada. A radiação global apresenta sazonalidade esperada para o período sendo os maiores valores entre outubro e março. Os picos horários máximos de R_g foram próximos a 900 W m^{-2} no verão e 500 W m^{-2} no inverno para dias de céu claro. A umidade relativa (RH) e o deficit de vapor pressão (VPD) apresentaram grande variabilidade no período. A precipitação pluvial máxima foi 51 mm no dia 08 de outubro. Ela ficou abaixo da normal climatológica em todos os meses exceto no mês de janeiro de 2016. A precipitação esperada para o período de estudo (Agosto a Junho), conforme as normais climatológicas, era de 1907 mm, no entanto a precipitação total foi apenas a metade (998 mm). Os anos de 2015 e 2016 foram caracterizado pelo fenômeno *El Niño* no sul do Brasil, segundo INMET. Embora este fenômeno apresenta maior probabilidade precipitação acima da média, neste sítio (e em estações meteorológicas próximas) observou-se o contrário.

Figura 4.1 – Variáveis meteorológicas: Temperatura do ar, Radiação global incidente, RH, VPD e Precipitação. A área destacada em amarelo representa o trigo, e a verde a soja, para o sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

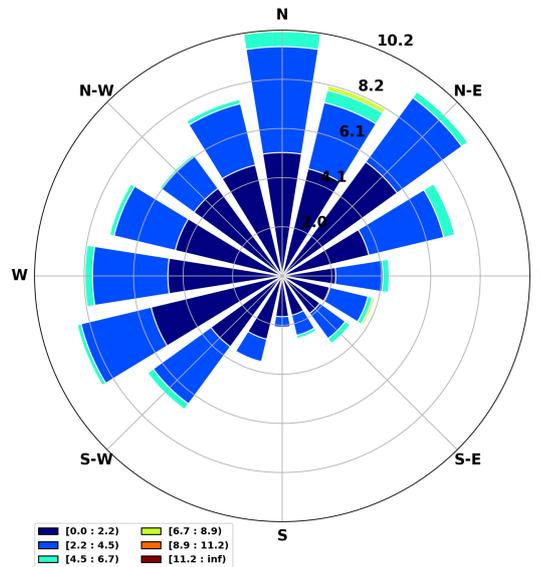
Figura 4.2 – Normais climatológicas: Temperatura do ar, Precipitação. A área destacada em amarelo representa o trigo, e a verde a soja, para o sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

A figura 4.3 mostra a direção que a predominante do vento no sítio experimental é entre Norte-Nordeste trazendo umidade e calor, porém uma parte significativa vem da direção Oeste-Sudoeste, caracterizados por massas de ar polar frias e secas.

Figura 4.3 – Rosa dos ventos para o sítio de Carazinho-RS.

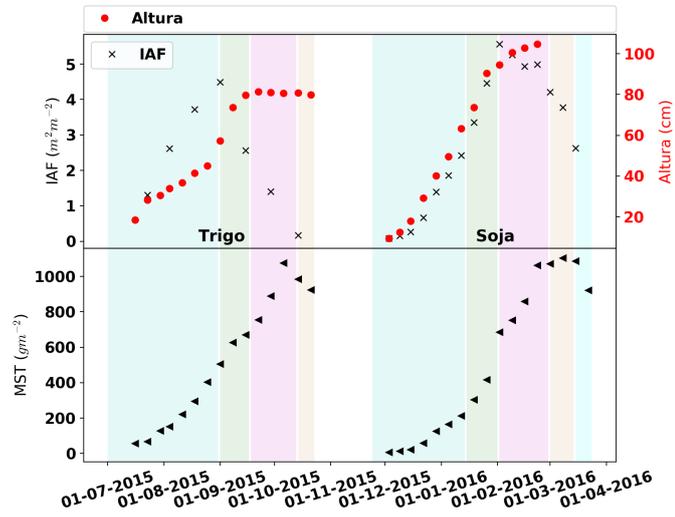


Fonte: Autor.

4.2 IAF E MST

Os parâmetros biológicos, índice de área foliar (IAF), altura do dossel e Massa Seca Total (MST) são mostrados para o trigo e a soja nas diferentes fases de desenvolvimento na figura 4.4. O trigo atinge o maior IAF $4,55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no dia 31 de agosto, ao final da fase 1, após esta data o IAF diminui até a fase 4. A altura não apresenta a mesma resposta. O IAF máximo ocorre antes da altura máxima de 80 cm, esta altura se mantém constante até a colheita. Na soja, o IAF e a altura tem comportamento similar, ambas atingem os valores máximos durante a fase 3, sendo $5,53 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no dia 02 de fevereiro, e 104,7 cm no dia 22 do mesmo mês, respectivamente. Após este período o IAF diminui até $2,61 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ao final da fase 4, a altura deixou de ser medida por permanecer constante neste período. A MST aumenta gradualmente em ambos os casos até a fase 4 chegando ao pico de $1087 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ no dia 05 de outubro para o trigo e $1117 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ para a soja no dia 08 de março de 2016, e passa a diminuir na fase de maturação, finalizando com valores similares de $916 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ para a trigo e $920 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ para o soja.

Figura 4.4 – Índice de área foliar e matéria seca total para o trigo e soja para as respectivas fases de desenvolvimento (representadas pela sequência de cores azul (fase 1), verde (fase 2), rosa (fase 3), marron (fase 4) e azul claro (fase 5)) das plantas para o sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

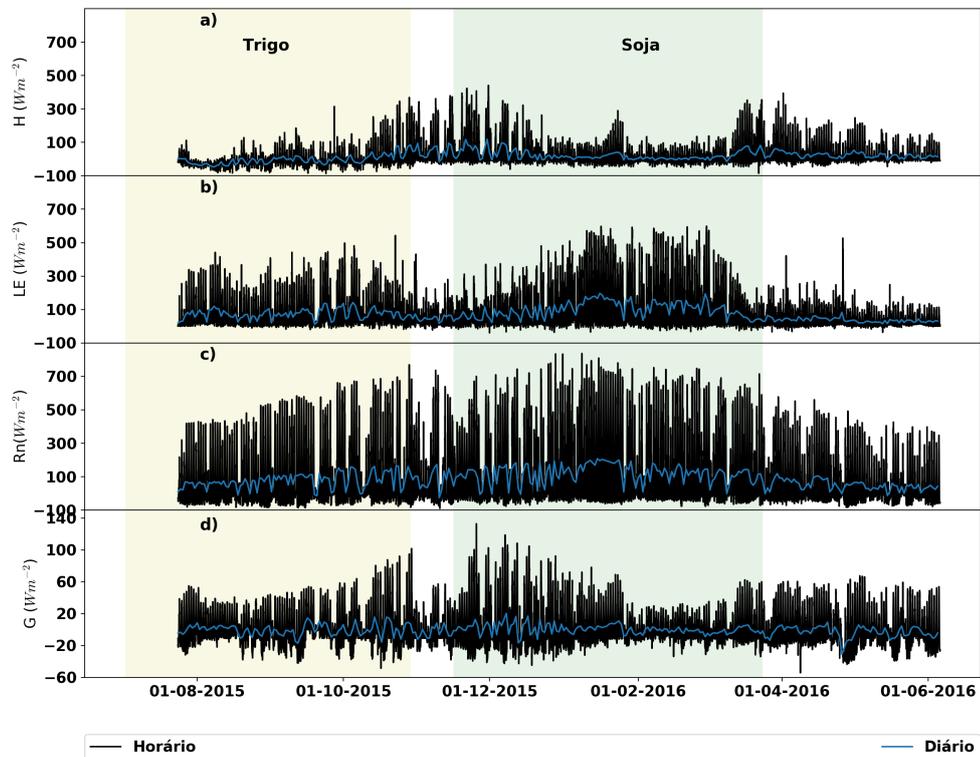
4.3 FLUXOS DE ENERGIA

As componentes do balanço de energia: fluxos de calor sensível, calor latente, saldo de radiação e fluxo de calor no solo em escala de tempo horária e diária são mostrados na figura 4.5. Os maiores valores de H ocorrem em períodos com menor IAF (pousio, senescência ou crescimento das plantas). O pico máximo de H foi de $440,71 \text{ W m}^{-2}$ no dia 30 de novembro de 2015. Entre os dias 27 de julho e 11 de outubro aparecem vários dias em sequência em que o fluxo de calor sensível permanece negativo mesmo durante o dia. Este fenômeno será melhor analisado na seção 4.4. O LE apresenta os maiores valores durante a safra da soja no máximo desenvolvimento das plantas. O saldo de radiação, apresenta sazonalidade similar ao R_g figura 4.1. O fluxo de calor no solo apresenta sazonalidade similar ao H, embora durante o pousio entre o trigo e a soja, os valores diminuam de forma considerável. Este fenômeno ocorre pois a palha afeta diretamente a temperatura da superfície, modificando a transferência de energia para o solo (SARKAR; PARAMANICK; GOSWAMI, 2007)

Os períodos com plantas apresentam um crescimento do LE durante o crescimento das culturas, e os menores valores quando nos períodos de pousio. Neste período, não há transpiração das plantas apenas a evaporação da água do solo. O H tem os menores valores nos períodos de máximo desenvolvimento. Isto indica que a maior parte da energia

é utilizada para a evapotranspiração e uma pequena parte para aquecer a atmosfera.

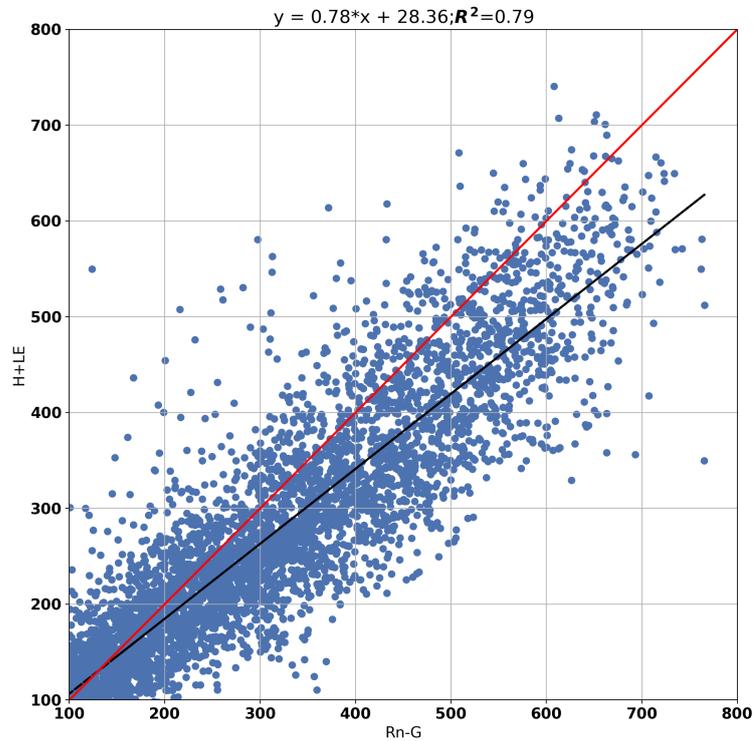
Figura 4.5 – Fluxos de calor sensível (a), calor latente (b), saldo de radiação (c) e calor do solo (d) para os sítio de Carazinho-RS. A área destacada em amarelo representa o trigo e em verde a soja.



Fonte: Autor.

Para análise do fechamento do balanço de energia os valores de $R_n - G$ abaixo de 100 W m^{-2} foram removidos para eliminar condições de estabilidade típicas de períodos noturnos (HERNANDEZ-RAMIREZ et al., 2010). O fechamento do balanço de energia foi de 78% com $R^2=0,79$, como mostrado na figura 4.6. O resíduo do balanço de energia neste trabalho foi 22%, na literatura são considerados como bom fechamento do balanço de energia valores de resíduo entre 10 e 30%, sendo essa energia geralmente atribuída à subestimativa dos fluxos turbulentos medidos usando o EC (AUBINET et al., 2010; WILSON et al., 2002; KANDA et al., 2004; SÁNCHEZ; CASELLES; RUBIO, 2010; BARR et al., 2012).

Figura 4.6 – Fechamento do balanço de energia para o sítio de Carazinho-RS. A linha vermelha representa linha 1 por 1, e a linha preta a regressão linear.



Fonte: Autor.

O fechamento do balanço de energia por fase de desenvolvimento de cada cultura é mostrado na figura 4.7. No período completo do trigo o fechamento foi de 74% e o coeficiente de determinação $R^2 = 0,80$, e para a soja o fechamento do balanço de energia foi de 78% e $R^2 = 0,83$. Os valores encontrados estão de acordo com a literatura (WILSON et al., 2002; FOKEN et al., 2010) e mostram um bom fechamento do balanço. Tanto para soja quanto para o trigo as fases iniciais apresentam os menores valores do balanço de energia, podendo ser causado pela influencia da heterogeneidade devido ao crescimento das plantas, e a rápida mudança da superfície (altura das plantas).

Figura 4.7 – Fechamento do balanço de energia para o trigo (lado esquerdo) e soja (lado direito) para cada uma das fases de desenvolvimento das culturas para o sítio de Carazinho-RS. A linha vermelha representa o 1 por 1 e a linha preta a regressão linear.

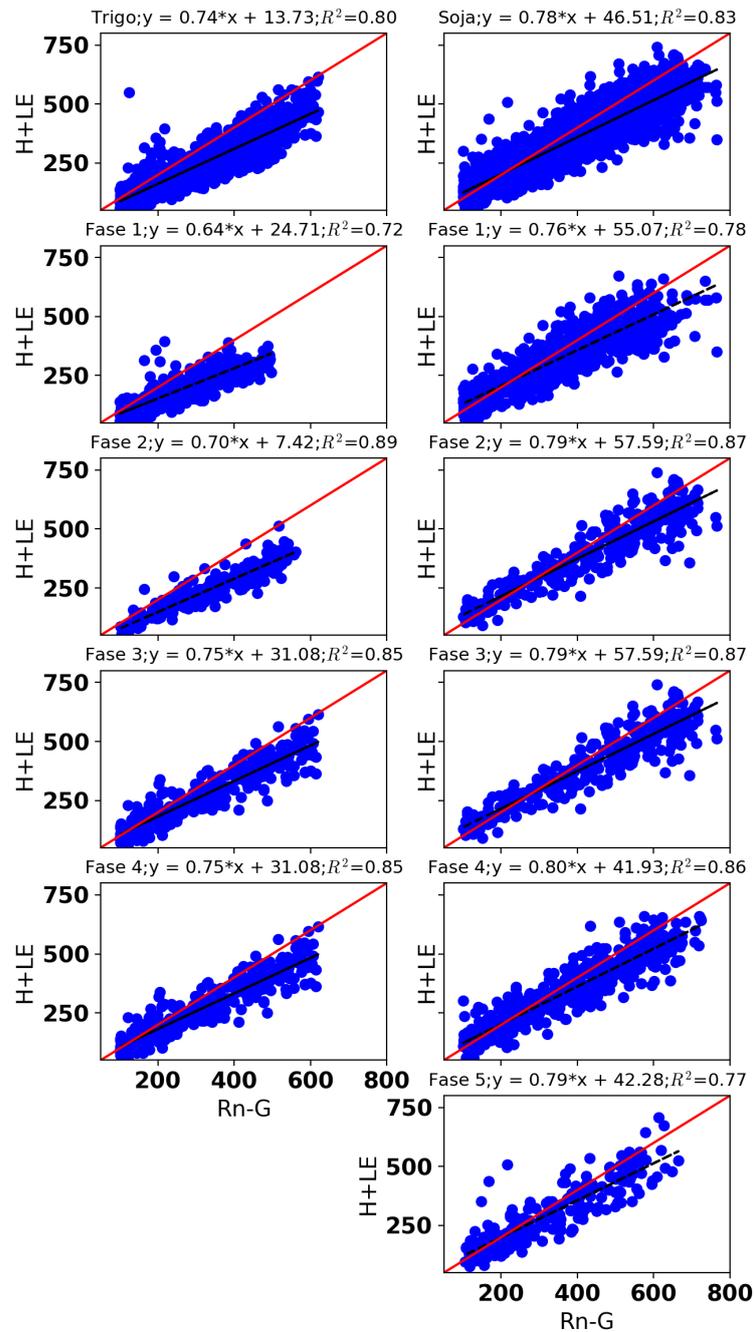


Tabela 4.1 – Valores médios dos ciclos diários das componentes do balanço de energia (Rn, H, LE, G) e o resíduo do balanço de energia (Res) para o trigo e as respectivas fases de desenvolvimento das culturas (seção 3.2.1).

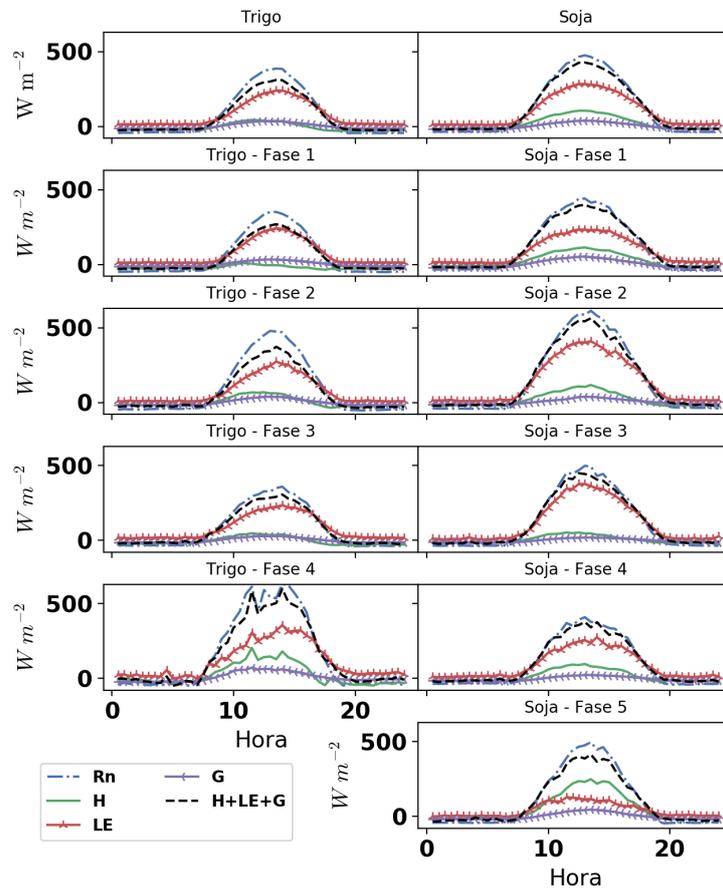
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Trigo
Rn (W m⁻²)	56,38	92,09	78,62	155,81	75,21
H (W m⁻²)	-21,27	1,50	-4,72	25,82	-7,59
LE (W m⁻²)	68,51	74,29	81,53	116,59	75,00
G (W m⁻²)	0,09	-2,64	-0,24	8,44	-0,18
Res (W m⁻²)	9,06	18,94	2,04	4,95	7,99

Tabela 4.2 – Valores médios dos ciclos diários das componentes do balanço de energia (Rn, H, LE, G) e o resíduo do balanço de energia (Res) para a soja e as respectivas fases de desenvolvimento das culturas (seção 3.2.1).

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Soja
Rn (W m⁻²)	118,38	156,29	121,71	96,74	104,08	121,08
H (W m⁻²)	26,67	17,01	4,05	14,82	55,81	21,08
LE (W m⁻²)	91,49	139,67	121,42	90,49	43,31	101,40
G (W m⁻²)	2,08	2,08	-1,22	-3,21	0,53	0,59
Res (W m⁻²)	-1,85	-2,48	-2,55	-5,36	4,43	-1,99

A figura 4.8 mostra o ciclo diário das componentes do balanço de energia, para as fases do trigo e da soja. É observado que a fase de maior desenvolvimento gera um aumento o resíduo de energia, dado pela diferença entre a energia disponível Rn e a soma dos fluxos ($\text{Res} = \text{Rn} - \text{H} - \text{LE} - \text{G}$).

Figura 4.8 – Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia (Rn, H LE, G, H+LE+G) separados em diferentes fases de desenvolvimento das culturas para o sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

A Tabela 4.2 mostra os valores médios das variáveis Rn, H, LE, G e o resíduo de energia para as 5 fases da soja, e para a safra completa. No ciclo completo, 17,4% da energia disponível foi utilizada para aquecer a atmosfera (H), 83,4% para mudança de estado da água (LE), 0,44% foi utilizada para aquecer o solo (G), e o resíduo correspondeu a -1,64%. A fase com maior energia disponível foi a fase 2 com partição de energia similar ao ciclo completo da soja. A fase 4 utilizou mais de 93% da energia disponível para LE, indicando uma forte evapotranspiração nesta fase.

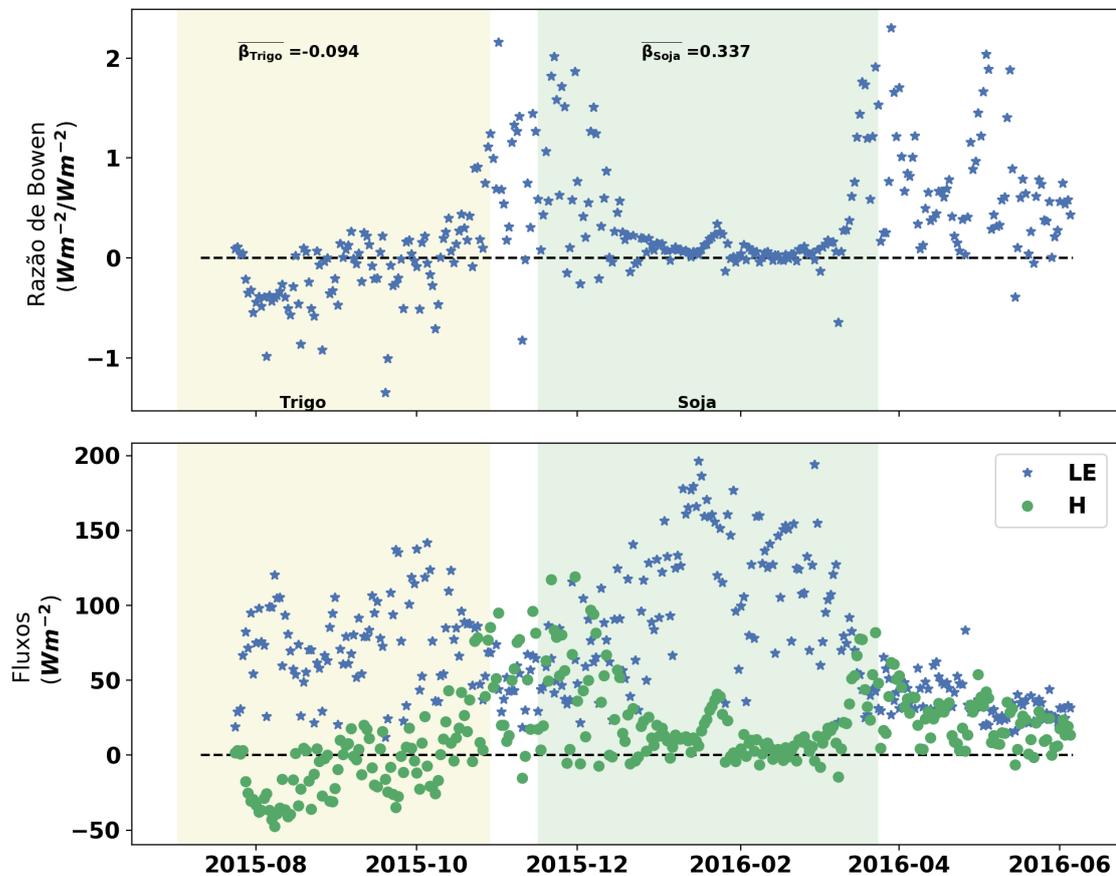
A Tabela 4.1 mostra os valores médios das componentes do balanço de energia para o trigo e as 4 fases de desenvolvimento. O trigo apresenta valores negativos para o H no período completo e nas fases 1 e 3 (este fenômeno será melhor analisado na seção 4.4). Em média, o Rn para o trigo foi $75,21 \text{ W m}^{-2}$, sendo -10,1% da energia na forma de H, 99,7% para o LE e 0,24% para o G, enquanto que o resíduo representou 10,62% do

Rn. Desta forma durante a safra do trigo quase 100% da energia que chegou a superfície foi utilizada para mudança do estado da água. Esta diferença é ainda maior durante a fase 1 o LE representa 121,5% do Rn, o H -33,73%, o G 0,16% e o resíduo foi 16,07%. Este resultado indica que pode haver advecção de energia.

A razão de Bowen, figura 4.9, mostra como é distribuída a energia utilizada tanto para aquecer a atmosfera (H) quanto para evapotranspirar (LE). A razão de Bowen apresenta valores negativos durante a safra de trigo, com média de -0,094, praticamente toda a energia disponível é usada para o LE e o sinal negativo é causado pelo H. Para a soja, o valor médio foi 0,337, ou seja, quase 66% da energia é usada para processos de evapotranspiração. Suyker e Verma (2008) em estudo sobre a soja no estado de Nebraska, Estados Unidos, obtiveram em média a energia utilizada para o H de 30% e 70% para o LE.

O LE tem os maiores valores nas fases de maior desenvolvimento das culturas, enquanto o H comanda nas fases de menor desenvolvimento, tanto para o trigo quanto para a soja. Nos períodos de senescência do trigo e soja, no crescimento da soja e nos períodos de pousio a razão de Bowen apresenta valores maior do que 1, indicando que a maior parte da energia disponível é utilizada para aquecer a atmosfera. Nos períodos de máximo desenvolvimento da soja, a razão de Bowen teve valores muito próximos de zero, indicando que a maior parte da energia é usada para a evapotranspiração. Durante o mês de janeiro, a precipitação foi bem abaixo da média climática (61 mm ao todo, principalmente na segunda quinzena) e alta VPD, conforme figura 4.1. Neste período houve aumento tanto na razão de Bowen quanto no fluxo de calor sensível.

Figura 4.9 – Média diária da razão de Bowen, H e LE para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o trigo e a verde a soja, a linha preta pontilhada o zero.

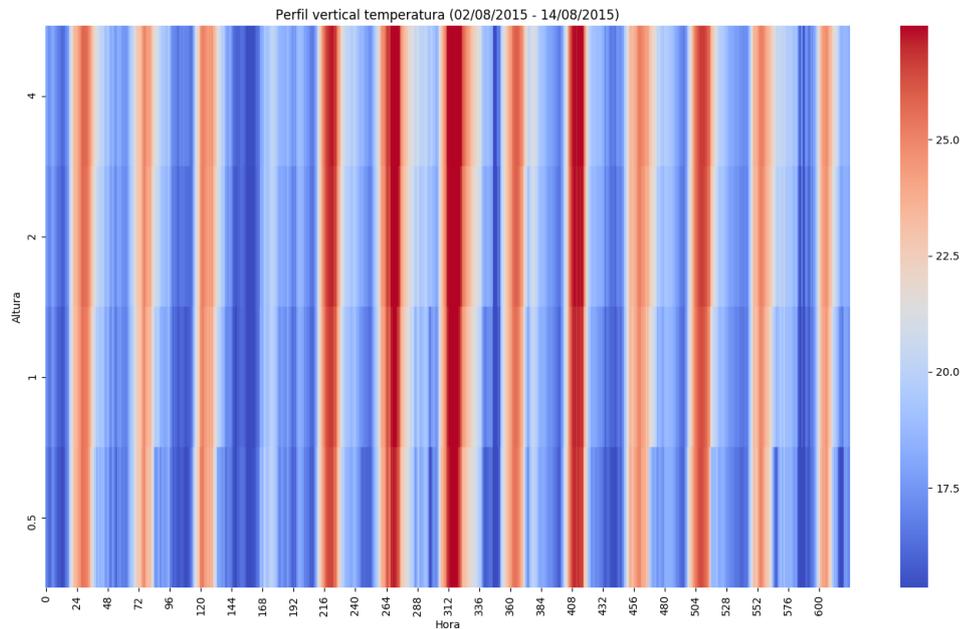


Fonte: Autor.

4.4 FLUXO DE CALOR SENSÍVEL NEGATIVO

A razão de Bowen negativa observada no período do trigo (figura 4.9) pode indicar o surgimento do efeito oásis, isto é, uma superfície mais fria que a atmosfera (STULL, 1988; OKE, 1987), geralmente um fenômeno que ocorre em culturas irrigadas. O fluxo de calor sensível negativo observado pode ser causado pela advecção de calor sensível. O fluxo de calor sensível negativo ocorre à noite, geralmente nas primeiras horas da manhã e ao final da tarde (LI; YU, 2007), contudo, no período do cultivo do trigo um número significativo de dias consecutivos foram caracterizados por H negativo ao longo do dia. Em um experimento realizado em Nebraska, nos Estados Unidos, SUYKER2008 encontrou 24 dias para a soja e 36 dias para milho irrigados em que a razão de Bowen foi de aproximadamente -0,30.

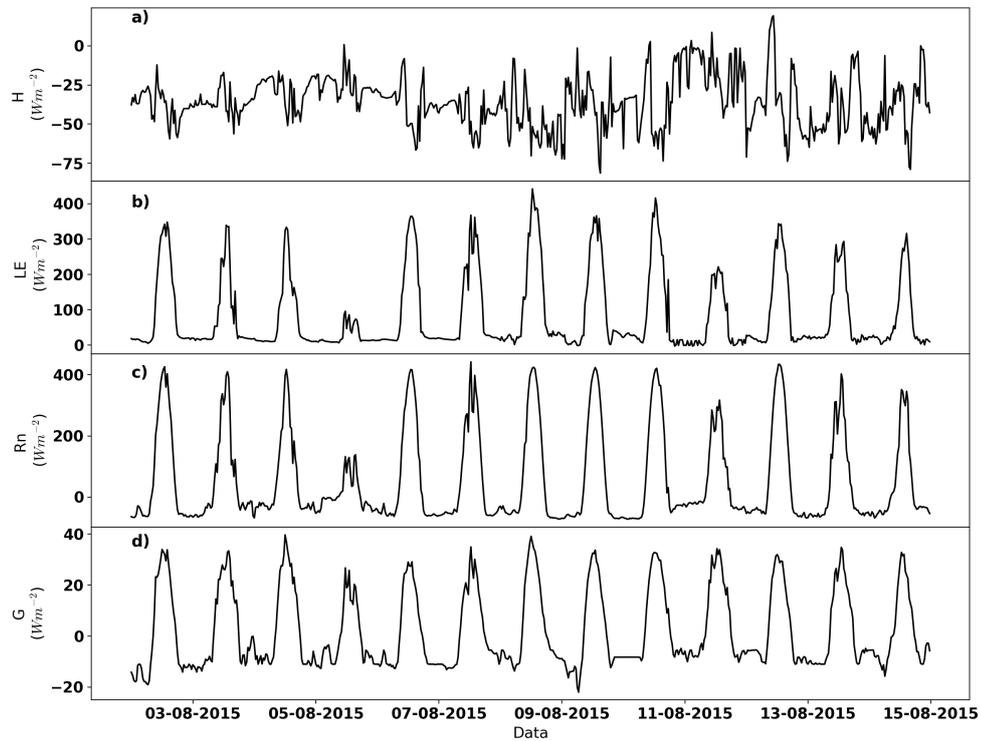
Figura 4.10 – Perfil vertical de temperatura entre os dias 02 e 14 de agosto de 2015 para o sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

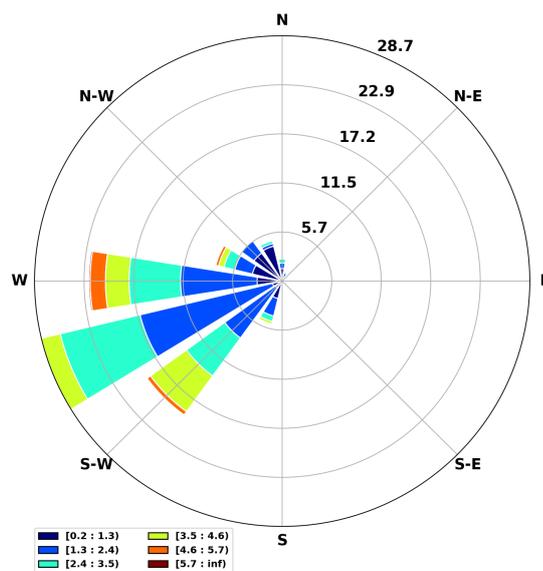
A figura 4.10 apresenta o perfil vertical de temperatura para o período entre 02 e 14 de agosto de 2015. As menores temperaturas são observadas próximas do solo (0,5 m), e as temperaturas mais elevadas ocorrem a 4 m, essa diferença permanece tanto no dia quanto na noite, indicando que a temperatura do ar aumentou com a altura. Neste período o valor médio diário de H permanece negativo como pode ser visto na figura 4.11. Nestes dias ocorreu um evento de precipitação (4 de agosto), totalizando 1,4 mm e um dia com muita nebulosidade (5 de agosto). Nestes dias a direção predominante do vento é entre oeste e sudoeste, mostrado na figura 4.12, possivelmente ligado a um intenso fenômeno sinótico. Este evento pode estar associado também a condições locais e deve ser estudado com mais rigor futuramente.

Figura 4.11 – Fluxos de calor sensível (a), calor latente (b), saldo de radiação (c) e calor do solo (d) entre os dias 02 e 14 de agosto de 2015 para o sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

Figura 4.12 – Rosa dos ventos para o período entre os dias 02 e 14 de agosto de 2015 o sítio de Carazinho-RS.



Fonte: Autor.

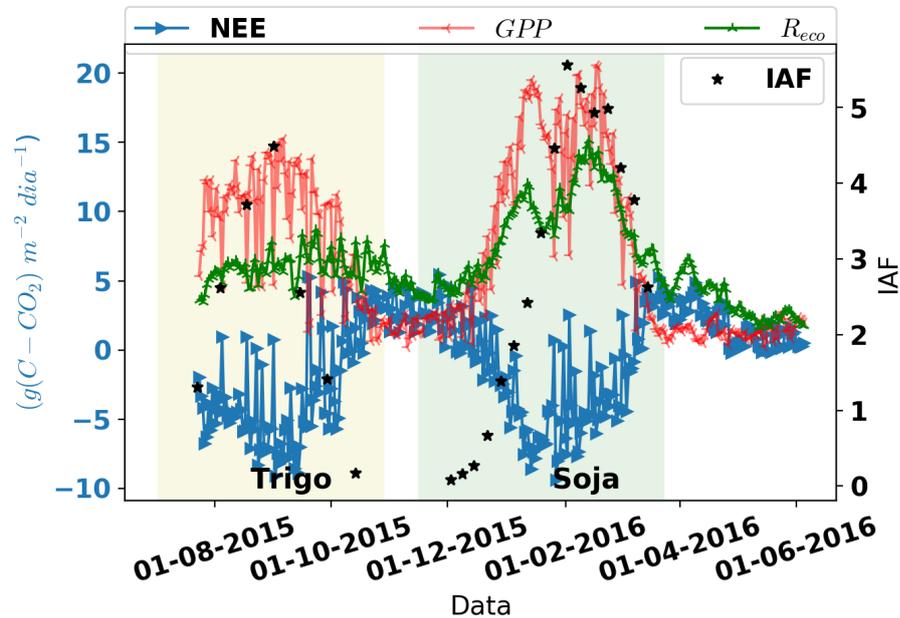
4.5 PARTIÇÃO DO FLUXO DE CO₂

A partição dos fluxos de CO₂ foi feita utilizando o pacote ReddyProc Reichstein et al. (2014), sendo a respiração do ecossistema obtida em função da temperatura do ar conforme proposto por Reichstein et al. (2005), e a produção primária bruta foi obtida usando a metodologia (LASSLOP et al., 2010). A figura 4.13 mostra a partição do fluxo de CO₂ e o índice de área foliar. O NEE apresenta comportamento típico, aumentando a magnitude com o desenvolvimento de ambas as culturas, e diminuindo a absorção de CO₂ quando diminui o IAF, tornando-se positivo nos períodos de senescência em ambas as culturas, pousios, e nos primeiros dias da soja. A maior absorção para o trigo foi -9,31 g (C-CO₂) m⁻² dia⁻¹ e para a soja 9,39 g (C-CO₂) m⁻² dia⁻¹.

O GPP máximo foi 15,6 g (C-CO₂) m⁻² dia⁻¹ para o trigo e 20,7 g (C-CO₂) m⁻² dia⁻¹ para a soja, enquanto o mínimo foi 0,84 g (C-CO₂) m⁻² dia⁻¹, durante o período de maturação do trigo e 3,6 g (C-CO₂) m⁻² dia⁻¹ logo após a emergência da soja. A R_{eco} em ambas as culturas é máxima durante o período de maior índice de área foliar, porém para a soja a respiração diminui acompanhando o IAF. O mesmo comportamento não é observado para o trigo, onde a respiração diminui mais lentamente. Portanto, quanto maior o IAF maior a absorção de CO₂ devido a fotossíntese. Esta relação também faz aumentar a respiração das plantas aliado a maiores temperaturas do ar no verão. Desta forma o maior NEE ocorre durante o ciclo da soja, pois tem as maiores temperaturas do ar, incidência de radiação solar, e IAF. Após chegar ao pico de IAF, 4,5 m² m⁻² para o trigo e 5,5 m² m⁻² para a soja, ambas as culturas começam a secar diminuindo o IAF no período de senescência das plantas.

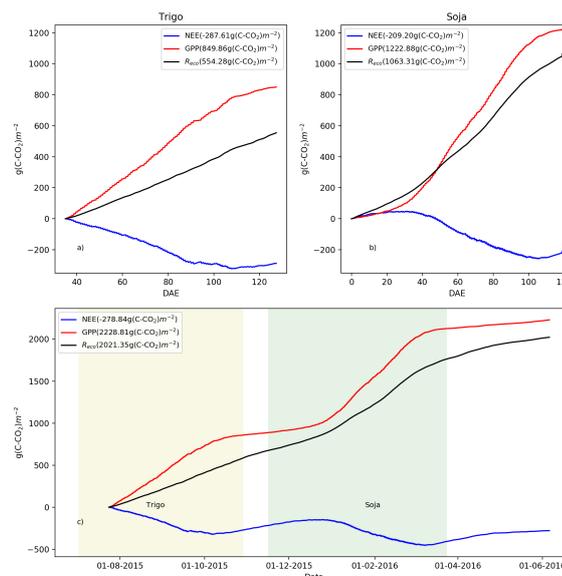
Os valores acumulados da partição de fluxos de CO₂ são mostrados na figura 4.14. Durante os ciclos das culturas há maior absorção de CO₂, enquanto nos períodos de pousio ocorre emissão de CO₂, pois o GPP é nulo, e a respiração predomina. Nestes casos quem comanda é a respiração heterotrófica que varia entre 60 e 80% da respiração do ecossistema (W.; H., 1992; JANSSENS et al., 2002). Para o período analisado os valores acumulados de NEE foi de -278,84 g(C-CO₂) m⁻², enquanto que o GPP e R_{eco} foi 2228,81 g(C-CO₂) m⁻² e 2021,35 g(C-CO₂) m⁻², respectivamente.

Figura 4.13 – Partição do fluxo de CO₂ líquido (NEE) em produção primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (R_{eco}) para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o período de cultivo do trigo e a verde o período de cultivo da soja.



Fonte: Autor.

Figura 4.14 – Partição do fluxo de CO₂ acumulada (NEE) em produção primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (R_{eco}) para o trigo (a), soja (b) e para o período completo de estudo (c) para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o período da safra de trigo e a verde o período da safra de soja.



Fonte: Autor.

Para o período da cultura do trigo não tivemos dados dos primeiros 35 dias após a emergência (DEP), em geral caracterizados por forte emissão de CO₂. Portanto, os fluxos

aqui apresentados não representam o total de trocas entre a superfície e atmosfera para caracterizar o trigo. Se considerarmos o período de 35 dias após a emergência até a colheita do trigo, este sistema absorveu um total de foi $-287,61 \text{ g (C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, com GPP de $849,86 \text{ g (C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ e a respiração total de $554,28 \text{ g (C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ (figura 4.14-a)).

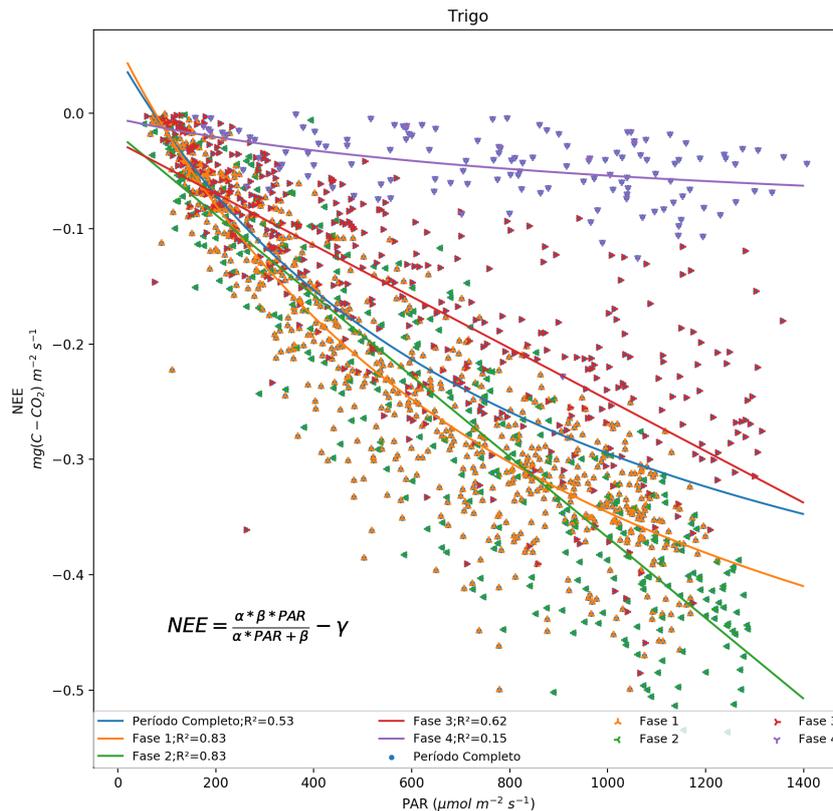
Os acumulados para a soja são mostrados na figura 4.14-b). A soja passa a ser um sorvedouro de carbono no dia 30 de dezembro (36 dias após a emergência), quando o acumulado de NEE passa a ser negativo, chegando ao final da safra com $-209,20 \text{ g(C-CO}_2\text{) m}^{-2}$. Este valor encontrado está de acordo com outros valores encontrados na literatura, como pode ser visto na tabela 2.2. O GPP e a R_{eco} foram de $1222,88 \text{ g (C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ e $1063,31 \text{ g (C-CO}_2\text{) m}^{-2}$, respectivamente. Valores entre 586 e $1195 \text{ g (C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ para o GPP e para o R_{eco} 586 a $931 \text{ g (C-CO}_2\text{) m}^{-2}$ foram encontrados para soja sem irrigação nos Estados Unidos (WAGLE; XIAO; SUYKER, 2015; SUYKER; VERMA, 2012; WAGLE et al., 2017).

4.6 RELAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO GLOBAL E A FOTOSSÍNTESE

A fotossíntese e, conseqüentemente, o IAF estão diretamente relacionada com a radiação solar incidente (radiação global - R_g). Desta forma, a eficiência na utilização do R_g pelo dossel para sintetizar o carbono acompanha o desenvolvimento das plantas. Assim, no início do cultivo esta eficiência é baixa, chegando ao máximo no maior IAF e diminui com a maturação das plantas. As figuras 4.15 e 4.16 mostram esta relação para as diferentes fases do trigo e soja, respectivamente. Com a evolução das culturas, a curva de ajuste varia acompanhando o IAF. Os valores dos parâmetros α , β e γ da equação (2.22) (pag 24) são mostrados nas tabelas 4.3 e 4.4 e apresentam grande variabilidade nos diferentes fases tanto da soja quanto do trigo.

Para o trigo, durante as fases 1 e 2 o trigo apresentou forte coeficiente de determinação ($R^2=0,83$). Entretanto com a diminuição do IAF o coeficiente de determinação diminuiu para 0,62 para a fase 3, e foi quase nulo na fase 4 com 0,15, período após a maturação do trigo.

Figura 4.15 – Dispersão NEE diurno com a radiação PAR para o trigo. Em cores estão representados as diferentes fases de desenvolvimento do trigo. As linhas representam os ajustes lineares usando a equação (2.22). " α " representa a eficiência com que a luz é utilizada pelo dossel e " β " é a taxa máxima de CO₂ absorvida pelo dossel na saturação da luz e " γ " é a R_{eco}.



Fonte: Autor.

Para a soja, tanto na fase 1 quanto na fase 4, o NEE apresenta menor correlação com o R_g, pois na fase inicial as plantas estão pequenas e há pouca área "verde" para realizar a fotossíntese, e na fase final a soja está secando e diminuindo a capacidade de realizar a fotossíntese. Durante a fase de crescimento a correlação entre NEE e R_g aumenta, atingindo o valor máximo de correlação de 0,85 no período que corresponde aos maiores índices de área foliar, como pode ser visto na figura 4.4.

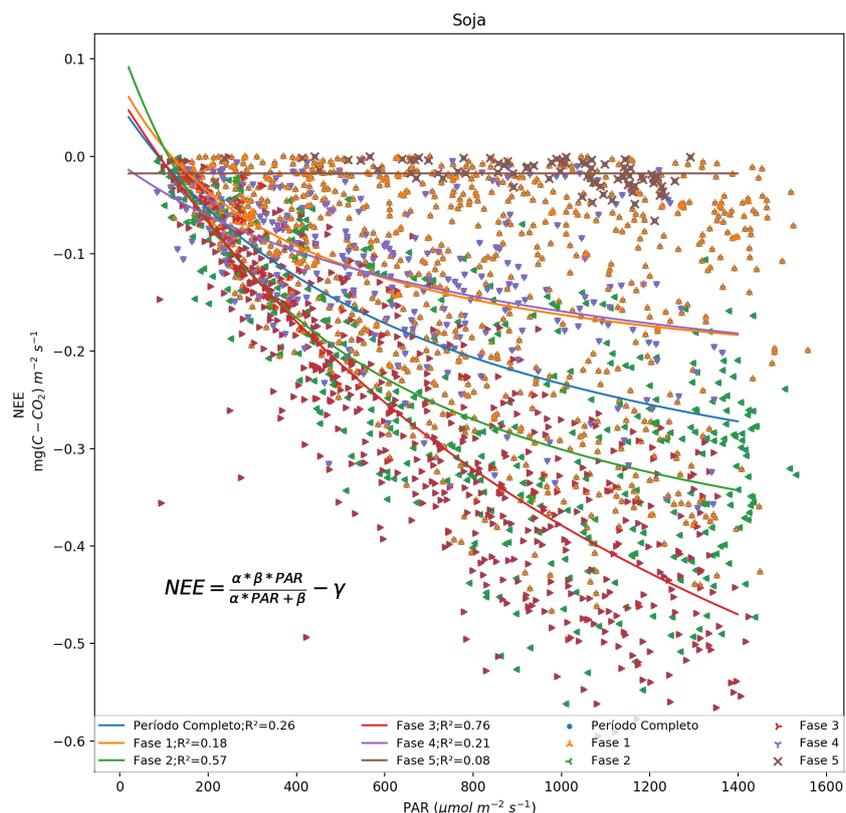
Em um cultivo de trigo no inverno WANG, LIAO e GUO (2013) descreve um comportamento similar da resposta do NEE com a variação do IAF e a radiação PAR. Estas variáveis são fatores determinantes para variabilidade interanual nos fluxos de CO₂. No entanto a resposta do NEE ao PAR apresenta resposta diferentes sob condições com nebulosidade e céu claro e as características do dossel, Béziat, Ceschia e Dedieu (2009) avaliou culturas de trigo, girassol e milho, e concluiu que a estrutura do dossel contribui

Tabela 4.3 – Coeficientes de ajuste (α, β, γ) da relação NEE-PAR usando a equação 2.22 para a safra de trigo em Carazinho-RS.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Trigo - Completo
α	-8.492E-04	-3.493E-04	-2.230E-04	-9.307E-05	-7.427E-04
β	-7.758E-01	2.981E+06	1.245E+06	-1.045E-01	-6.427E-01
γ	5.965E-02	-1.827E-02	-2.524E-02	-4.935E-03	4.985E-02

para penetração de luz e pode contribuir com a saturação precoce da cultura devido a incidência de radiação solar, diminuindo a capacidade de realizar fotossíntese.

Figura 4.16 – Dispersão NEE diurno com Rg para o trigo. Em cores estão representados as diferentes fases de desenvolvimento da soja. As linhas representam os ajustes lineares usando a equação (2.22) " α " representa a eficiência com que a luz é utilizada pelo dossel " β " é a taxa máxima de CO₂ absorvida pelo dossel na saturação da luz e " γ " é a R_{eco}.



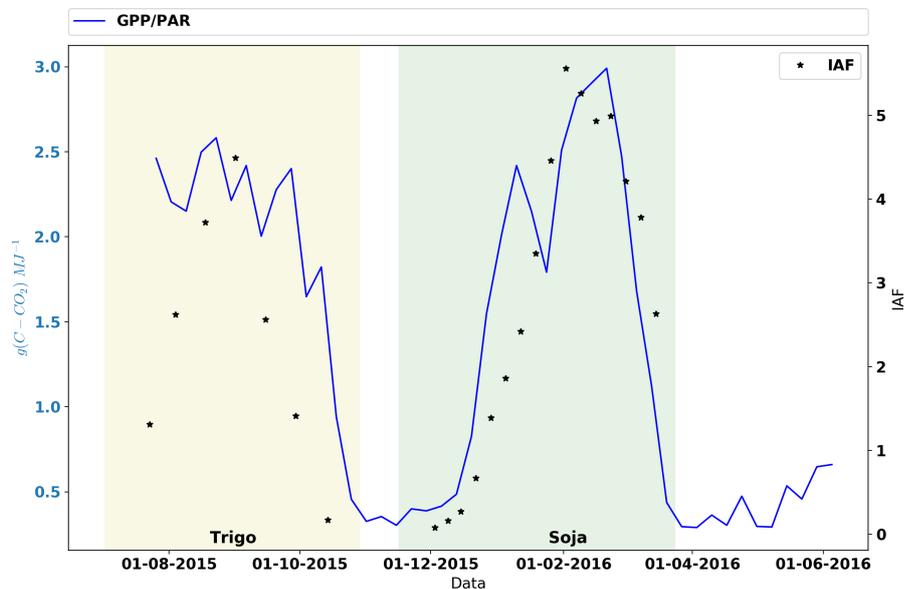
Para calcular a eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa, utilizamos a relação similar a TURNER et al. (2003) e Suyker et al. (2005) que calculam a eficiência do uso da radiação pela cultura definido como a razão entre o GPP e radiação fotossinteticamente ativa. Neste trabalho não foi medido experimentalmente o PAR e, portanto, foi utilizado PAR=0,388*Rg (PASHIARDIS; KALOGIROU; PELENGARIS, 2017). A figura

Tabela 4.4 – Coeficientes (α , β , γ) de ajuste da relação NEE-PAR usando a equação 2.22 para a safra de soja em Carazinho-RS.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Período Completo
α	-8.617E-04	-1.306E-03	-7.309E-04	-3.327E-04	1.724E-01	-6.924E-04
β	-3.325E-01	-6.130E-01	-1.106E+00	-2.788E-01	-3.324E-06	-4.904E-01
γ	7.727E-02	1.163E-01	6.146E-02	-7.447E-03	-1.758E-02	5.357E-02

4.17 mostra a eficiência do uso da luz para valores acumulados semanalmente do GPP e PAR. Quanto maior o IAF maior a eficiência na utilização da radiação. Esta relação é esperada, pois quanto maior é o IAF maior é a capacidade de realizar fotossíntese. O pico de maior eficiência para o trigo foi de 2,56 g (C-CO₂) MJ⁻¹ e para a soja o pico de eficiência foi de 2,97 g (C-CO₂) MJ⁻¹. Não é de conhecimento do autor esta estimativa para o trigo. Para a soja Suyker et al. (2005) obteve 1,6 g (C-CO₂) MJ⁻¹ enquanto Rochette et al. (1996) encontrou 2,1 g (C-CO₂) MJ⁻¹, ambos para soja de sequeiro. Desta forma, a soja cultivada no sul do Brasil apresenta uma maior eficiência no uso da luz.

Figura 4.17 – Eficiência do uso da luz acumulado semanalmente para o sítio de Carazinho-RS.



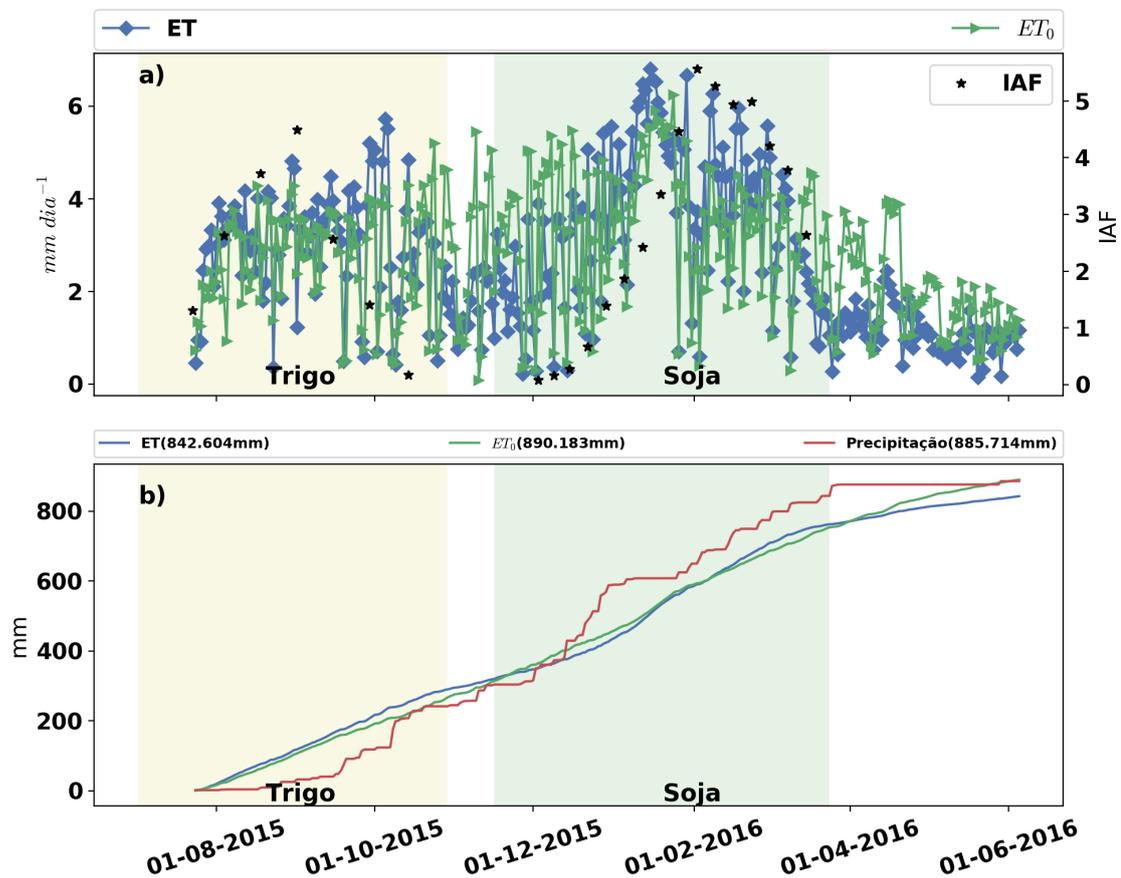
Fonte: Autor.

4.7 BALANÇO DE ÁGUA

A figura 4.18-a) mostra a evapotranspiração (ET) e evapotranspiração de referência (ET₀). A tabela 4.5 apresenta os valores de ET por fase da soja e trigo. Pouca dife-

rença é encontrada entre ET e ET_0 nas duas safras. As diferenças acontecem pois o ET acompanha as mudanças biológicas causadas pela cultura enquanto a ET_0 utiliza apenas variáveis meteorológicas para sua estimativa. Durante a safra do trigo houve pouca precipitação, assim a evapotranspiração e a evapotranspiração de referência foram maior que o total precipitado. Para a soja, a maior evapotranspiração, $6,8 \text{ mm dia}^{-1}$ ocorreu no dia 15 de janeiro, enquanto que o máximo IAF registrado no dia 02 de fevereiro. Durante a soja, teve mais disponibilidade de água. A figura 4.18-b) mostra o valor acumulado da ET, ET_0 e precipitação acumulada no período de estudo. O total evapotranspirando foi 842.6 mm, enquanto que o valor de referência é de 890.18 mm, a precipitação total foi 885,7 mm.

Figura 4.18 – a) Evapotranspiração real, evapotranspiração de referência e índice de área foliar. b) Evapotranspiração real, evapotranspiração de referência e precipitação acumulada para o sítio de Carazinho-RS. A área amarela representa o período do trigo e a verde a soja.



Fonte: Autor.

Na tabela 4.5 são mostrados os acumulados de evapotranspiração para o trigo e para a soja. A evapotranspiração da soja foi de 428,15 mm sendo as fases 1 e 3 as com maior consumo de água. A evapotranspiração do trigo foi menor, entretanto o estudo iniciou no 35° dia após a emergência da cultura. O acumulado no período foi de 279,13 mm, a fase 1 teve o maior consumo de água.

Tabela 4.5 – Evapotranspiração acumulada em cada fase de desenvolvimento do trigo e da soja.

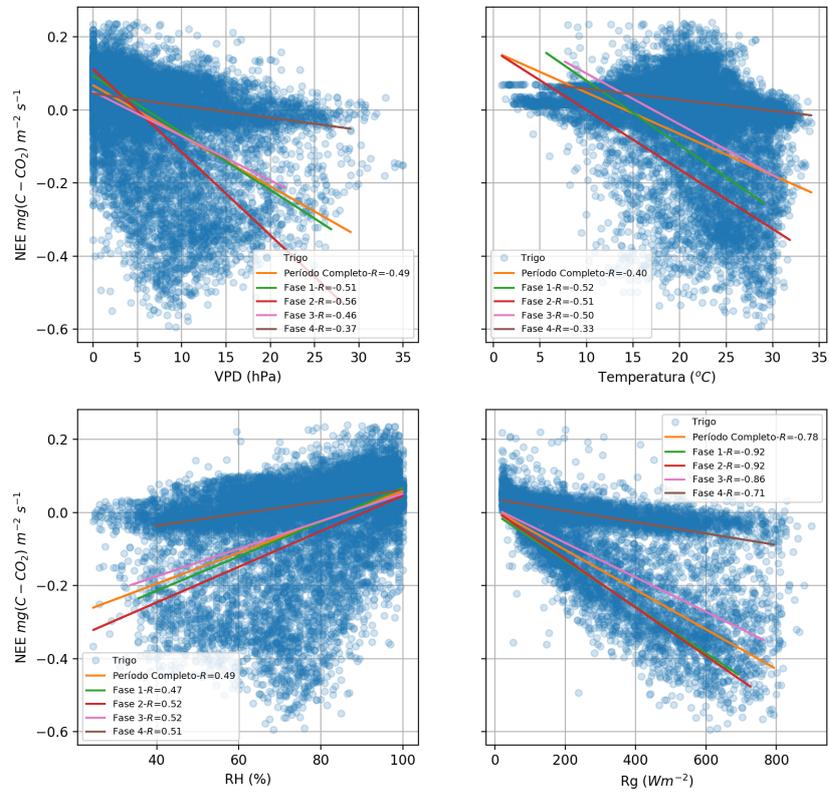
	Trigo	Soja
Período Completo	279,19mm	428.15mm
Fase 1	116,61mm	165.37mm
Fase 2	55,49mm	87.33mm
Fase 3	77,3mm	117.48mm
Fase 4	29,78mm	41.99mm
Fase 5	—	15.99mm

4.8 RELAÇÃO DO NEE COM AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

As figuras 4.19 e 4.20 mostram as relações de dispersão entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, temperatura, RH e Rg, as linhas coloridas representam as regressões lineares para cada fase do trigo e da soja (para a relação com Rg foram removidos os valores noturnos ($R_g < 20 \text{ W m}^{-2}$)). Para a soja, os maiores coeficientes de correlação (R) ocorrem na fase 3 com todas as variáveis ambientais, exceto para o VPD que tem maior correlação na fase 4 ($R=-0,54$). A variável ambiental que apresenta maior correlação é o Rg, nas fases 3 e 5, apresentando forte correlação ($R=-0,89$ e $R=-0,74$, respectivamente). Nas demais fases a correlação foi moderada. A temperatura apresenta forte correlação na fase 3 com $R=-0,73$ e moderada nas demais fases. O RH apresenta correlação moderada, na fase 3 com $R=0,69$. O VPD apresenta correlação fraca ou moderada. Para o trigo, apenas a Rg apresentou uma correlação forte para as fases 1, 2 e 3. No entanto, o período completo e a fase 4 apresentam correlação moderada. As demais variáveis apresentam correlação baixa ou moderada. A diferença entre as relações do NEE com as variáveis ambientais nas culturas pode estar associadas as sazonalidade das variáveis ou as características de cada cultura.

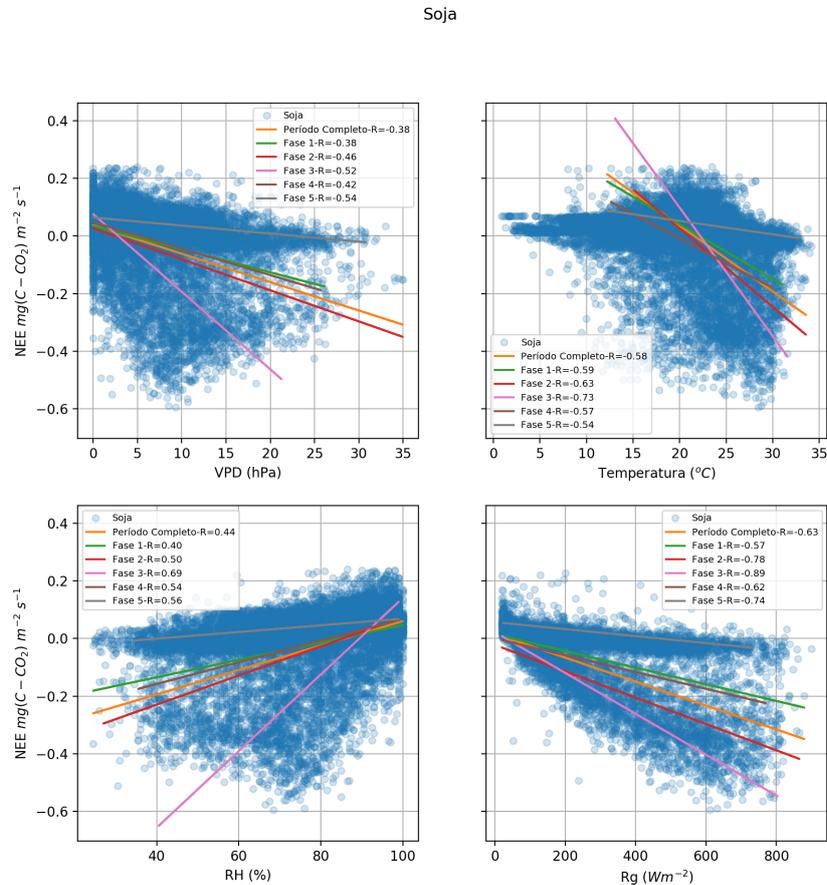
Figura 4.19 – Dispersão entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para o trigo e as 4 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase.

Trigo



Fonte: Autor.

Figura 4.20 – Dispersão entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para a soja e as 5 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase.



Fonte: Autor.

A figura 4.21 apresenta os loops de histerese entre o NEE com as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg utilizando ciclo médio diário nas diferentes fases de desenvolvimento do trigo e da soja. As variáveis foram normalizadas usando o seu valor máximo da série de dados a fim de poder comparar os loops nos diferentes períodos. As áreas foram calculadas utilizando a função matemática trapz (DEVELOPERS, 2013). O NEE é positivo durante a noite, pois há apenas respiração, e durante o dia, pode ser positivo ou negativo, dependendo do IAF e da radiação incidente. As histereses de menor intensidade são as do NEE com a radiação global, apresentando uma relação quase linear para ambas as culturas. No entanto, a fase 2 de ambas as culturas tem uma área um pouco maior, 0,08 para a soja e 0,05 para o trigo. Com a diminuição do IAF e o processo de maturação das plantas a abertura desta histerese tende a diminuir, tornando-se quase linear. Este fenômeno pode ser atribuído a falta de fotossíntese devido a senescência.

A histerese formada pela relação NEE-VPD tem sentido anti-horário, com formato que lembra uma elipse e apresentam as maiores áreas comparadas com as demais rela-

ções. A maior intensidade da histerese (área) é encontrada para a soja. Comparando-se a safras completas, a histerese NEE-VPD no trigo é 22,2% menor que na soja. A fase 2 tem maior intensidade, $A=0,22$ para a soja, que é a maior área nos períodos analisado e para o trigo, $A=0,12$. Esta fase é a de maior desenvolvimento das culturas. As fases de maturação apresentam uma histerese mais fechada. Ambas as culturas tem a mesma área 0,03.

Os loops de histerese entre o NEE e a temperatura tem sentido anti-horário, e forma circular. Os loops são deslocados no eixo da temperatura. Essa relação pode ser associada a sazonalidade da temperatura. A maior intensidade ocorreu na fase 2 da soja com uma área de 0,13. A fase 5 do trigo tem comportamento linear, indicando que nesta fase a temperatura comanda o processo. A relação com o RH tem sentido horário e forma semelhante a uma elipse, a histerese teve mais intensidade para o trigo $A=0,8$ do que para soja $A=0,7$.

A figura 4.22 mostra o ciclo diário médio do NEE e as variáveis ambientais VPD, temperatura, RH e Rg para o trigo do lado esquerdo e para a soja do lado direito. É possível verificar que a única variável que tem uma relação direta de causa e efeito com o NEE é o Rg. As demais variáveis atingem os valores máximos/mínimos algum tempo após o NEE o chegar ao valor mínimo e começar a decrescer. Esta diferença de fase ou atraso da resposta pode ser associada a maior ou menor abertura nos loops de histerese.

Figura 4.21 – Relação de histerese dos ciclos diários médios entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para o trigo e a soja, e as respectivas fases de desenvolvimento das culturas. O NEE e as variáveis ambientais foram normalizados (valor máximo) para tornar possível a comparação entre elas. O "A" representa a área da histerese. Em azul é representado o ciclo completo.

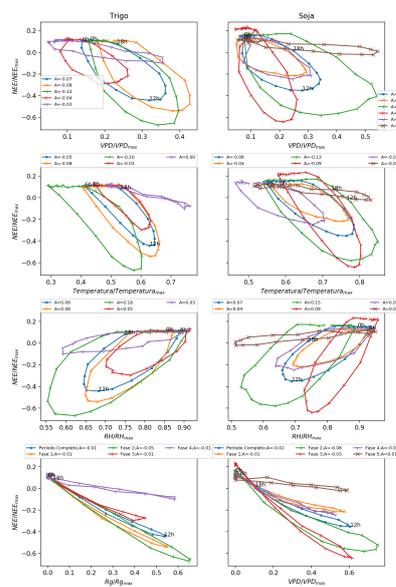
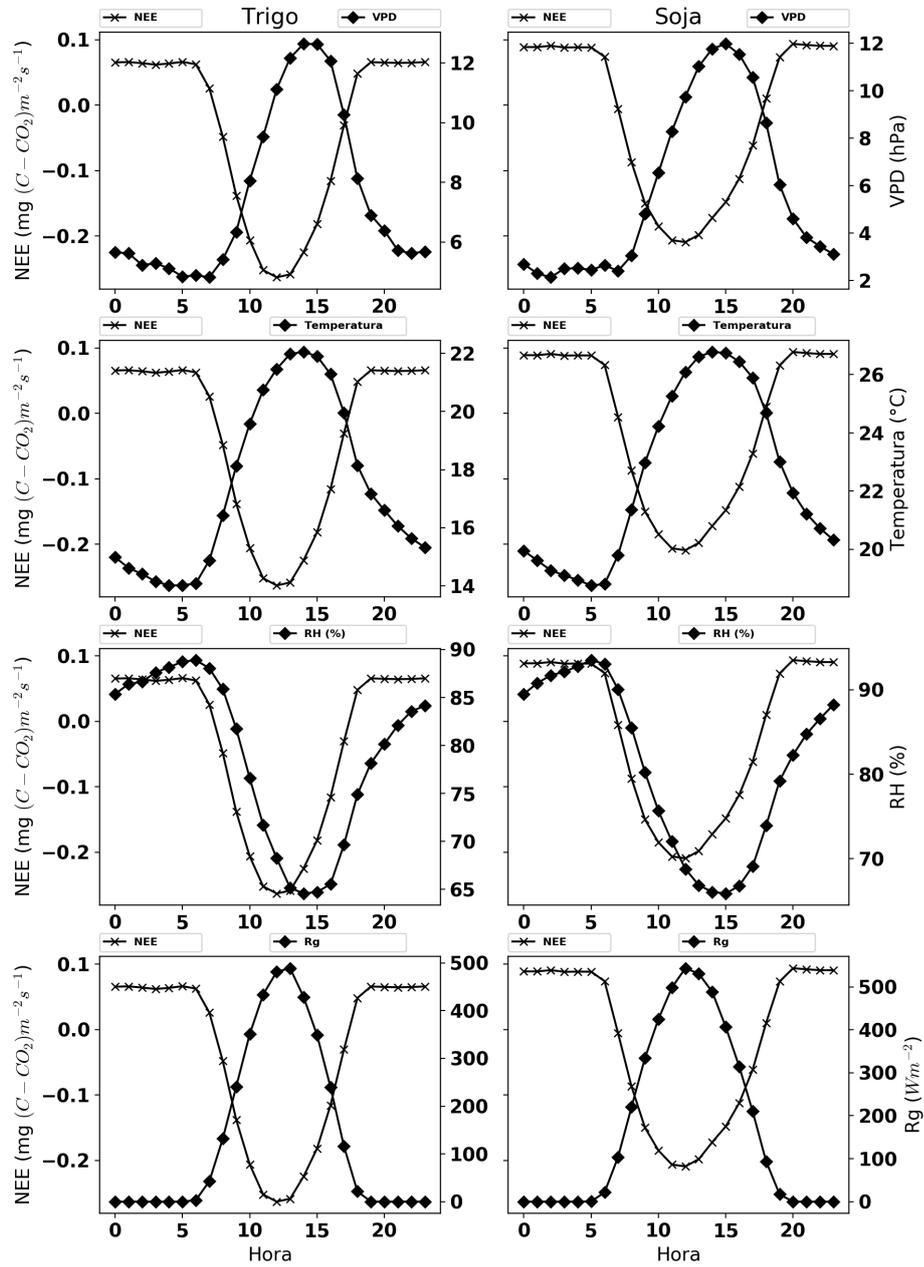


Figura 4.22 – Ciclo diário médio do NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg, para o trigo e a soja.



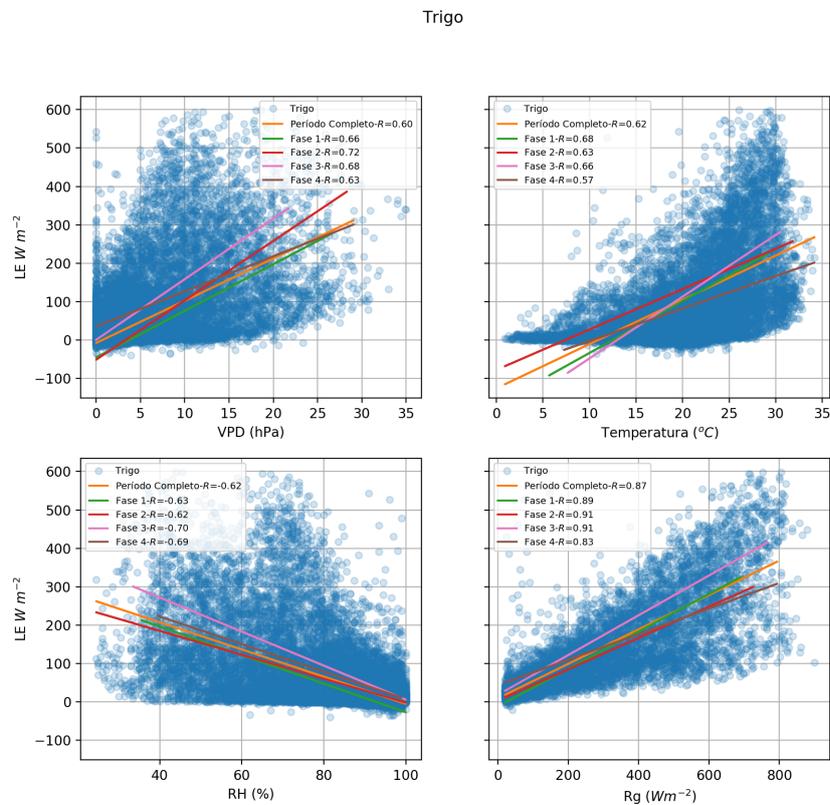
Fonte: Autor.

4.9 RELAÇÃO DO LE COM AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

A figura 4.23 mostra a relação de dispersão entre o LE e as variáveis ambientais VPD, temperatura, RH e Rg para o trigo e as fases de desenvolvimento. A variável com maior correlação foi o Rg, com forte correlação em todas as fases da cultura e correlação muito forte nos períodos de maior IAF e maturação. Seguido do RH e temperatura que apresentaram correlação de 0,62 para o período completo. O RH obteve as maiores índices de correlação nas fase 3 e 4. A correlação do LE com a temperatura foi moderada em todas as fases do trigo, assim como o VPD.

As correlações para a safra de soja são mostradas na figura 4.24. A variável de maior correlação é o Rg, que apresenta uma correlação muito forte nos períodos de maior desenvolvimento das plantas, e vai diminuindo nas demais fases. A temperatura apresenta correlação com o LE nas fases de maior desenvolvimento das plantas e correlação moderada nas demais fases. O RH apresenta forte correlação nas fases 3 e 4 e correlação moderada no restante do período. A variável com menor correlação é o VPD, que apresenta correlação moderada, com os maiores valores nos períodos de maior desenvolvimento das plantas.

Figura 4.23 – Dispersão entre o LE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para a soja e as 5 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase. Em azul é representado o ciclo completo.



Fonte: Autor.

A figura 4.25 mostra as relações de histerese entre LE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg utilizando ciclo médio diário para as diferentes fases de desenvolvimento do trigo e da soja. A análise foi similar a seção 4.8. Durante a noite o LE é próximo de zero, com a incidência de radiação solar iniciam os processos de evapotranspiração, em que parte da radiação incidente é utilizada para a evaporação da água, desta forma o LE aumenta. Próximo ao meio dia, no horário de maior incidência de radiação solar, o LE chega ao valor máximo e começa a diminuir gradualmente.

A relação LE-VPD tem sentido horário, com forma similar a uma elipse. A abertura do loop e a área para o trigo quase não é alterada ao longo da cultura, exceto para a fase 4. Para a soja houve grande variação tanto na intensidade da histerese quanto na inclinação do loop. A área da histerese aumenta e diminui acompanhando o IAF. A maior intensidade foi na fase 3, $A = 0,17$, enquanto para o trigo, a fase de maior intensidade foi de $A=0,04$.

A relação LE-Temperatura apresenta sentido horário, com formato similar a um semi-circulo, onde a parte da manhã é a mais reta, e a tarde tem maior curvatura. Os loops formados para o trigo não tem grande variação nem de área e nem forma apenas sendo deslocados no eixo da temperatura, sendo este comportamento provavelmente as-

sociado a sazonalidade. Para a soja a intensidade da histerese tem maior influência do IAF, com a fase 3 apresentando maior área, $A=0,9$, e as fases 1 e 5 com área $A=0,3$.

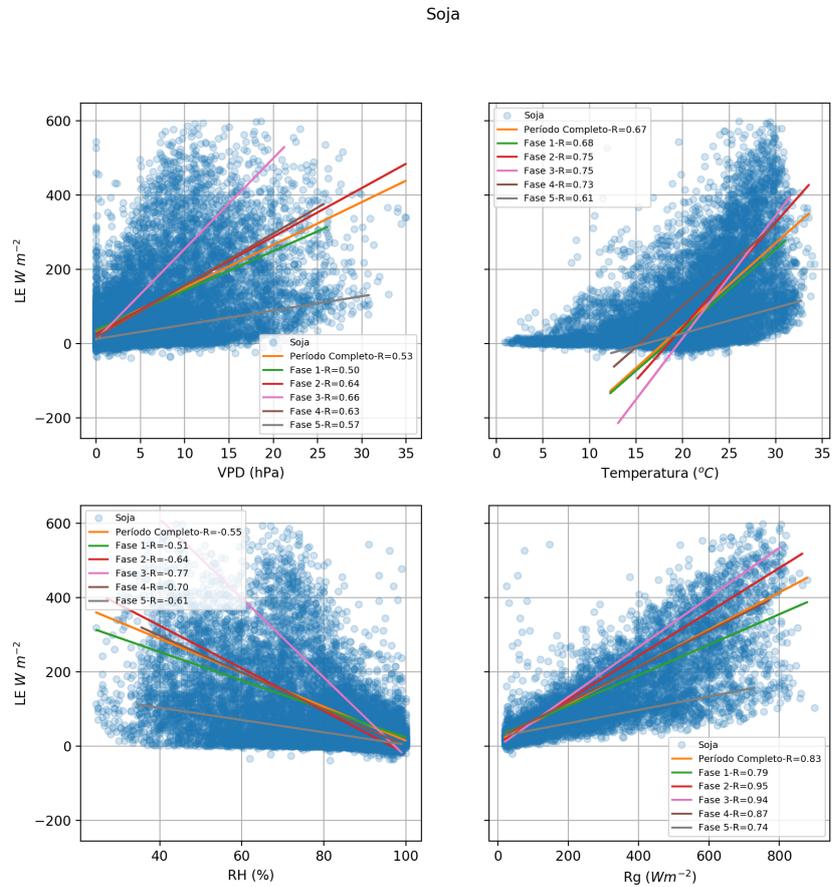
A relação LE-RH tem sentido anti-horário, e forma similar a uma elipse. No trigo há pouca variação no forma em todas as fases, e a área aumenta acompanhando o IAF. Na soja a variação da área é maior, mostrando que os loops são de maior intensidade. A área na fase 2 da soja foi igual a 0,11, e para o trigo foi 0,06. Porém, ao considerar as diferenças para o ciclo completo da soja e trigo, a diferença na área não é tão grande, sendo a área da soja 20% maior que a do trigo.

A relação LE-Rg tem sentido anti-horário, e formato quase linear, porém para o trigo a histerese tem maior intensidade, a relação de causa e efeito é direta.

O ciclo completo da soja para a relação LE-VPD apresenta histerese com área muito similar ao encontrado em Santa Maria-RS no bioma pampa, ($A=0,07$). A relação LE-Temperatura para este bioma ($A=0,04$) foi similar aos aqui encontrados para o trigo (RUBERT, 2017).

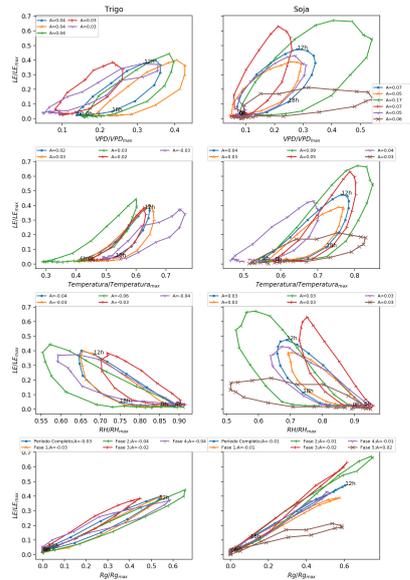
A figura 4.26 mostras o ciclo diário médio do LE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg. O valores máximos das variáveis ambientais VPD, temperatura e RH ocorrem cerca de duas horas após o LE chegar ao ponto máximo. Este diferença de fase, pode ser a causa das relações de histerese mostradas na figura 4.25. Este atraso quase não ocorre na relação LE-Rg, que no ciclo diário médio tem comportamento praticamente igual.

Figura 4.24 – Dispersão entre o NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para a soja e as 5 fases do desenvolvimento da cultura. As linhas coloridas representam os ajustes lineares para cada fase.



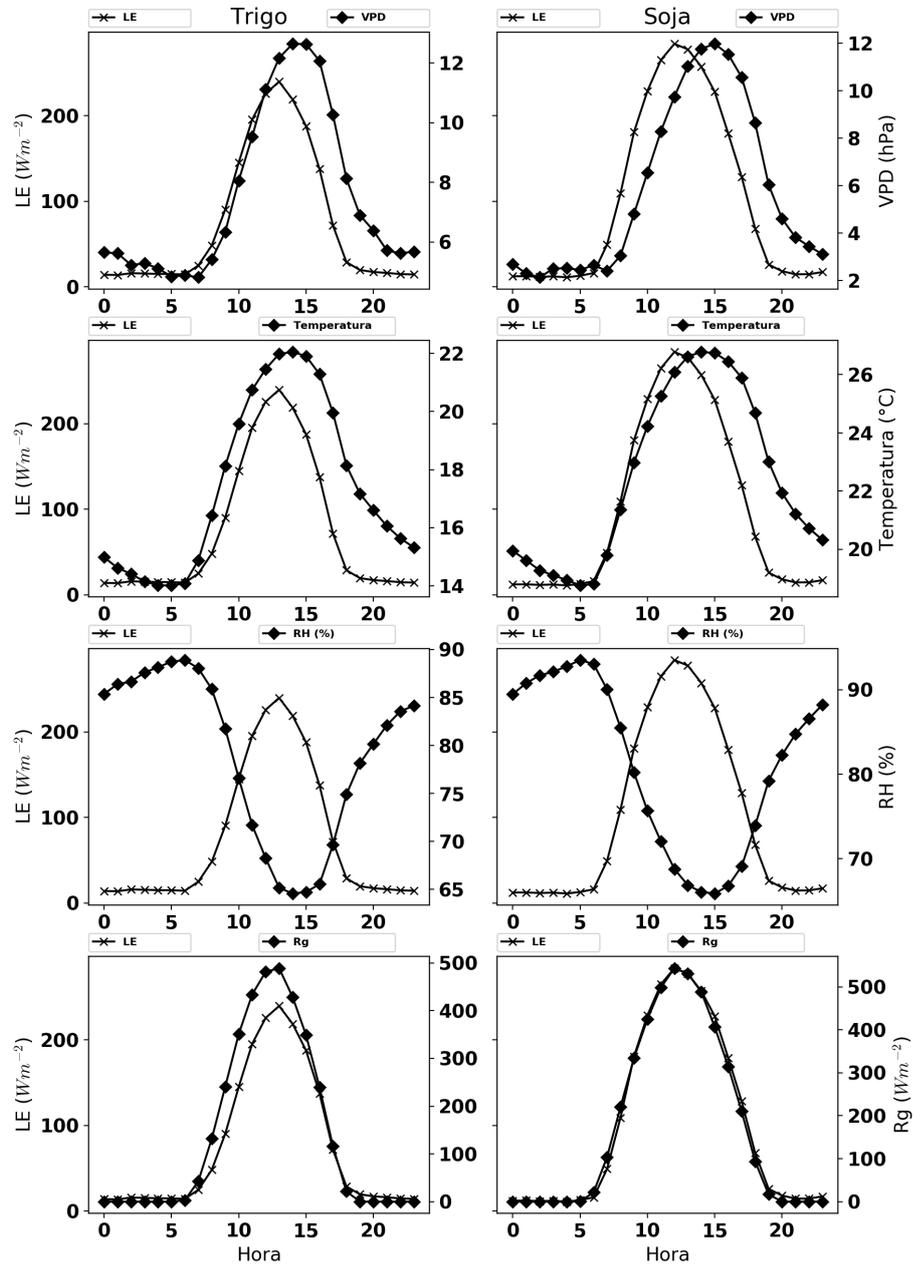
Fonte: Autor.

Figura 4.25 – Relação de histerese dos ciclos diários médios entre o LE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg para o trigo e a soja, e as respectivas fases de desenvolvimento das culturas. O LE e as variáveis ambientais foram normalizados (valor máximo) para tornar possível a comparação entre elas. O "A" representa a área da histerese. Em azul é representado o ciclo completo.



Fonte: Autor.

Figura 4.26 – Ciclo diário médio do NEE e as variáveis ambientais VPD, Temperatura, RH e Rg, para o trigo e a soja.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

O fechamento do balanço de energia para a série de dados foi de 78%, porém o fechamento para a cultura de trigo foi de 74% e da soja 78%. Ao dividir as culturas em fases de acordo com os estádios vegetativos, nota-se que o fechamento do balanço de energia melhora acompanhando o desenvolvimento das plantas. O melhor fechamento do balanço de energia pode ter relação com fatores biológicos das culturas.

A análise dos dados de fluxos de CO₂ utilizando o EC para o trigo e soja de sequeiro mostra que ambos comportaram-se como absorvedor de CO₂ sendo que o trigo, a partir 35° após a emergência, absorveu 287,61 g (C-CO₂) m⁻², enquanto a soja absorveu 209,20 g (C-CO₂) m⁻². A evapotranspiração para o período completo do estudo foi de 842,6 mm, deste total, aproximadamente 33% foi durante a safra de trigo e 57% para a soja.

As relações de histerese e correlação de fluxos indica que a variável ambiental com mais influência tanto no NEE quanto no LE é a radiação R_g, sendo responsável tanto pela fotossíntese quanto pela energia para os processos de evapotranspiração. As demais variáveis analisadas apresentam correlação moderada com o NEE. No entanto, apresentam relações de histerese mais significativas, indicando que podem ser fatores limitantes de NEE. As variáveis apresentaram boa correlação com o LE, com uma intensidade das histereses menor que as obtidas em relação ao NEE. Tanto as correlações quanto os fenômenos de histereses foram mais intensos para a soja. Esta diferença pode estar relacionada a maior exposição a luz solar da soja devido ao seu cultivo no verão.

As variáveis que controlam os fluxos tanto de CO₂ quanto de H₂O são o índice de área foliar e a radiação incidente. Em recente estudo Shao et al. (2015) utilizando 65 sítios experimentais usando EC mostrou que os fatores biológicos representam 57% da variabilidade interanual dos fluxos de CO₂ enquanto os fatores climáticos são associados a 43%.

(VEECK, 2018)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, O. C. et al. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 1, p. 1 – 10, 2009. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192308001962>>.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, v. 22, n. 6, p. 711–728, 12 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>>.

ANTHONI, P. M. et al. Winter wheat carbon exchange in thuringia, germany. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1, p. 55 – 67, 2004. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819230300162X>>.

ATKIN, O. K. et al. Evans review no. 2: The hot and the cold: unravelling the variable response of plant respiration to temperature. **Functional Plant Biology**, CSIRO, v. 32, n. 2, p. 87–105, 2005.

AUBINET, M. et al. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the belgian ardennes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 108, n. 4, p. 293–315, 2001.

_____. Direct advection measurements do not help to solve the night-time co2 closure problem: Evidence from three different forests. Elsevier, v. 150, n. 5, p. 655–664, 2010. ISSN 1873-2240. Disponível em: <<http://dx.doi.org/>>.

_____. 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.

_____. Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 149, n. 3-4, p. 407–418, 2009.

BAKER, J.; GRIFFIS, T. Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, n. 3, p. 163 – 177, 2005. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192304003065>>.

BALDOCCHI, D. 'breathing'of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. **Australian Journal of Botany**, CSIRO, v. 56, n. 1, p. 1–26, 2008.

_____. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere – the state and future of the eddy covariance method. **Global Change Biology**, v. 20, n. 12, p. 3600–3609, 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12649>>.

BALDOCCHI, D. et al. Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of fluxnet data. **International Journal of Biometeorology**, v. 49, n. 6, p. 377–387, Jul 2005. ISSN 1432-1254. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00484-005-0256-4>>.

BALDOCCHI, D.; CHU, H.; REICHSTEIN, M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: A review. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 520 – 533, 2018. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192317301806>>.

BALDOCCHI, D. et al. Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 11, p. 2415–2434, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2)>.

BARFORD, C. C. et al. Factors controlling long-and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 294, n. 5547, p. 1688–1691, 2001.

BARR, A. et al. Energy balance closure at the berms flux towers in relation to the water balance of the white gull creek watershed 1999–2009. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 153, p. 3 – 13, 2012. ISSN 0168-1923. Land-Atmosphere Interactions: Advances in Measurement, Analysis, and Modeling – A Tribute to T. Andrew Black. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192311001754>>.

BERNACCHI, C. J.; HOLLINGER., S. E.; MEYERS, T. The conversion of the corn/soybean ecosystem to no-till agriculture may result in a carbon sink. **Global Change Biology**, v. 11, n. 11, p. 1867–1872, 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2005.01050.x>>.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical review**, APS, v. 27, n. 6, p. 779, 1926.

BUCKLEY, T. N. The control of stomata by water balance. **New Phytologist**, v. 168, n. 2, p. 275–292, 2005. Disponível em: <<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-8137.2005.01543.x>>.

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.

BÉZIAT, P.; GESCHIA, E.; DEDIEU, G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in south west france. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 10, p. 1628 – 1645, 2009. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819230900118X>>.

CHI, J. et al. Assessing carbon and water dynamics of no-till and conventional tillage cropping systems in the inland pacific northwest us using the eddy covariance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218-219, p. 37 – 49, 2016. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192315007856>>.

CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. Applied hydrology, 572 pp. **Editions McGraw-Hill, New York**, 1988.

CHU, H. et al. Fluxes all of the time? a primer on the temporal representativeness of fluxnet. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 122, n. 2, p. 289–307, 2017. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JG003576>>.

DAVIS, P. et al. Assessing the effects of agricultural management practices on carbon fluxes: Spatial variation and the need for replicated estimates of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 4, p. 564 – 574, 2010. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192310000456>>.

DEOL, P. et al. Quantifying nonisothermal subsurface soil water evaporation. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 48, n. 11, 2012.

DEVELOPERS, N. Numpy. **NumPy Numpy. Scipy Developers**, 2013.

DUFRANNE, D. et al. Comparison of carbon fluxes, growth and productivity of a winter wheat crop in three contrasting growing seasons. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 141, n. 1, p. 133 – 142, 2011. ISSN 0167-8809. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880911000612>>.

EAGLE, A. J. et al. Greenhouse gas mitigation potential of agricultural land management in the united states. **A Synthesis of the Literature. Technical Working Group on Agricultural Greenhouse Gases (T-AGG) Report**, 2010.

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.

FAO. Compendium of agricultural–environmental indicators: 1989–91 to 2000. 2003.

FAO, S. Y. **World Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.(2013)**. 2013.

FEHR, W.; CAVINESS, C. Stages of soybean development. spec. rep. no. 80, coop. **Ext. Serv. Agric. and Home Econ. Expn. Stn., Iowa State Univ., Ames, IA**, 1977.

FINKELSTEIN, P. L.; SIMS, P. F. Sampling error in eddy correlation flux measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 106, n. D4, p. 3503–3509, 2001.

FOKEN, T. The energy balance closure problem: an overview. **Ecological Applications**, Wiley Online Library, v. 18, n. 6, p. 1351–1367, 2008a.

FOKEN, T. et al. Post-field data quality control. In: _____. **Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. p. 181–208. ISBN 978-1-4020-2265-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/1-4020-2265-4_9>.

_____. Corrections and data quality control. In: **Eddy covariance**. [S.l.]: Springer, 2012. p. 85–131.

_____. Energy balance closure for the litfass-2003 experiment. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1, p. 149–160, Jul 2010. ISSN 1434-4483. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-009-0216-8>>.

FOKEN, T.; WICHURA, B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, n. 1, p. 83 – 105, 1996. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192395022481>>.

FRANK, D. et al. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. **Global Change Biology**, v. 21, n. 8, p. 2861–2880, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12916>>.

GASH, J. H. C.; CULF, A. D. Applying a linear detrend to eddy correlation data in real-time. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 79, n. 3, p. 301–306, May 1996. ISSN 1573-1472. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00119443>>.

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**, v. 17, n. 2, 2003. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002GB002023>>.

GLENN, A. et al. Carbon dioxide exchange in a northern prairie cropping system over three years. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 7, p. 908 – 918, 2010. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192310000729>>.

GOULDEN, M. L. et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, v. 2, n. 3, p. 169–182, 1996. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00070.x>>.

GROVE, A. T. World atlas of desertification, 2nd edition, edited by n. j. middleton and d. s. g. thomas, arnold, london, 1997. no. of pages: x + 182.. isbn 0-340-69166-2. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 24, n. 3, p. 280–280, 1999. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291096-9837%28199903%2924%3A3%3C280%3A%3AAID-ESP955%3E3.0.CO%3B2-7>>.

GU, L. et al. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, n. 3, p. 179 – 197, 2005. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192304003053>>.

_____. Phenology of vegetation photosynthesis. In: _____. **Phenology: An Integrative Environmental Science**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003. p. 467–485. ISBN 978-94-007-0632-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0632-3_29>.

H., W. P. et al. Interannual variability in carbon dioxide fluxes and flux–climate relationships on grazed and ungrazed northern mixed-grass prairie. **Global Change Biology**, v. 14, n. 7, p. 1620–1632, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2008.01599.x>>.

HAVERD, V. et al. Air and biomass heat storage fluxes in a forest canopy: Calculation within a soil vegetation atmosphere transfer model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, n. 3, p. 125 – 139, 2007. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192307001876>>.

HAWKESFORD, M. J. et al. Prospects of doubling global wheat yields. **Food and Energy Security**, v. 2, n. 1, p. 34–48, 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fes3.15>>.

HERNANDEZ-RAMIREZ, G. et al. Energy balance and turbulent flux partitioning in a corn–soybean rotation in the midwestern us. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 1, p. 79–92, Mar 2010. ISSN 1434-4483. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-009-0169-y>>.

HOLLINGER, S. E.; BERNACCHI, C. J.; MEYERS, T. P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in north central region of the united states. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, n. 1, p. 59 – 69, 2005. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192305000444>>.

HUI, D.; LUO, Y.; KATUL, G. Partitioning interannual variability in net ecosystem exchange between climatic variability and functional change. **Tree Physiology**, v. 23, n. 7, p. 433–442, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/treephys/23.7.433>>.

INCREASED rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. **Global Change Biology**, v. 11, n. 2, p. 322–334, 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2005.00899.x>>.

JANSSENS, I. A. et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across european forests. **Global Change Biology**, v. 7, n. 3, p. 269–278, 2002. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2486.2001.00412.x>>.

JUN, L. et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in north china plain. **Science in China Series D: Earth Sciences**, v. 49, n. 2, p. 226–240, Nov 2006. ISSN 1862-2801. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11430-006-8226-1>>.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. **Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement**. [S.l.]: Oxford university press, 1994.

KANDA, M. et al. Les study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 110, n. 3, p. 381–404, Mar 2004. ISSN 1573-1472. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000007225.45548.7a>>.

KLJUN, N. et al. A simple parameterisation for flux footprint predictions. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 112, n. 3, p. 503–523, Sep 2004. ISSN 1573-1472. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000030653.71031.96>>.

KOOL, D. et al. Spatial and diurnal below canopy evaporation in a desert vineyard: Measurements and modeling. **Water Resources Research**, v. 50, n. 8, p. 7035–7049, 2014. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014WR015409>>.

KRAMER, K.; LEINONEN, I.; LOUSTAU, D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and mediterranean forests ecosystems: an overview. **International Journal of Biometeorology**, v. 44, n. 2, p. 67–75, Aug 2000. ISSN 1432-1254. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s004840000066>>.

KUTSCH, W. et al. The net biome production of full crop rotations in europe. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 139, n. 3, p. 336 – 345, 2010. ISSN 0167-8809. The carbon balance of European croplands. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880910002008>>.

LASSLOP, G. et al. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. **Global Change Biology**, v. 16, n. 1, p. 187–208, 2010. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x>>.

LAW, B. et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1, p. 97 – 120, 2002. ISSN 0168-1923. FLUXNET 2000 Synthesis. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192302001041>>.

LEE, X. et al. Long-term observation of the atmospheric exchange of co₂ with a temperate deciduous forest in southern ontario, canada. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D13, p. 15975–15984, 1999. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999JD900227>>.

LEI, H. et al. Biological factors dominate the interannual variability of evapotranspiration in an irrigated cropland in the north china plain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 250-251, p. 262 – 276, 2018. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192318300078>>.

LEI, H.; YANG, D. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the north china plain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 4, p. 581 – 589, 2010. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192310000468>>.

LEWCZUK, N. A. et al. Co₂ and n₂o flux balance on soybean fields during growth and fallow periods in the argentine pampas—a study case. **Soil and Tillage Research**, v. 169, p. 65 – 70, 2017. ISSN 0167-1987. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198717300259>>.

LI, L.; YU, Q. Quantifying the effects of advection on canopy energy budgets and water use efficiency in an irrigated wheat field in the north china plain. **Agricultural Water Management**, v. 89, n. 1, p. 116 – 122, 2007. ISSN 0378-3774. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377406003507>>.

LLOYD, J.; TAYLOR, J. A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, [British Ecological Society, Wiley], v. 8, n. 3, p. 315–323, 1994. ISSN 02698463, 13652435. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2389824>>.

MARCOLLA, B. et al. Climatic controls and ecosystem responses drive the inter-annual variability of the net ecosystem exchange of an alpine meadow. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 9, p. 1233 – 1243, 2011. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192311001444>>.

MAUDER, M.; FOKEN, T. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. **Meteorologische Zeitschrift**, Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, v. 15, n. 6, p. 597–609, 12 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0167>>.

MAUDER, M. et al. Evaluation of energy balance closure adjustment methods by independent evapotranspiration estimates from lysimeters and hydrological simulations. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 1, p. 39–50, Jan 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.11397>>.

MEYERS, T. P.; HOLLINGER, S. E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, n. 1, p. 105 – 115, 2004. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192304000620>>.

MOFFAT, A. M. et al. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, n. 3, p. 209 – 232, 2007. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819230700216X>>.

MONCRIEFF, J. et al. Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series. In: _____. **Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. p. 7–31. ISBN 978-1-4020-2265-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/1-4020-2265-4_2>.

_____. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, v. 188-189, p. 589 – 611, 1997. ISSN 0022-1694. HAPEX-Sahel. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169496031940>>.

MOUREAUX, C. et al. Carbon balance assessment of a belgian winter wheat crop (*triticum aestivum* L.). **Global Change Biology**, v. 14, n. 6, p. 1353–1366, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2008.01560.x>>.

OKE, T. Boundary layer climates. 2nd. **Methuen**, 289p, v. 548, 1987.

ONCLEY, S. P. et al. The energy balance experiment ebex-2000. part i: overview and energy balance. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, n. 1, p. 1–28, Apr 2007. ISSN 1573-1472. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10546-007-9161-1>>.

PAPALE, D. Data gap filling. In: _____. **Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 159–172. ISBN 978-94-007-2351-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_6>.

PAPALE, D. et al. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. **Biogeosciences**, European Geosciences Union, v. 3, n. 4, p. 571–583, nov. 2006. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00330317>>.

PASHIARDIS, S.; KALOGIROU, S.; PELENGARIS, A. Characteristics of photosynthetic active radiation (par) through statistical analysis at larnaca, cyprus. **SM J. Biometrics Biostat**, v. 2, n. 2, p. 1009, 2017.

QUÉRÉ, C. L. et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. **Nature geoscience**, Nature Publishing Group, v. 2, n. 12, p. 831, 2009.

RAZ-YASEEF, N. et al. Vulnerability of crops and native grasses to summer drying in the u.s. southern great plains. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 213, p. 209 – 218, 2015. ISSN 0167-8809. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880915300359>>.

REBMANN, C. et al. Treatment and assessment of the co₂-exchange at a complex forest site in thuringia, germany. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 150, n. 5, p. 684–691, 2010.

REICHSTEIN, M. et al. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the european summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. **Global Change Biology**, v. 13, n. 3, p. 634–651, 2006. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2006.01224.x>>.

_____. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, n. 9, p. 1424–1439, 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>>.

_____. Reddyproc: Data processing and plotting utilities of (half-) hourly eddy-covariance measurements. **R package version 0.6-0/r9**, 2014.

_____. Partitioning of net fluxes. In: AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. (Ed.). **Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 263–289. ISBN 978-94-007-2351-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_9>.

RICHARDSON, A. D. et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, The Royal Society, v. 365, n. 1555, p. 3227–3246, 2010. ISSN 0962-8436. Disponível em: <<http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/365/1555/3227>>.

_____. Environmental variation is directly responsible for short- but not long-term variation in forest-atmosphere carbon exchange. **Global Change Biology**, v. 13, n. 4, p. 788–803. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2007.01330.x>>.

ROCHA, H. R. D. et al. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. sp4, p. 22–32, 2004. Disponível em: <<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/02-6001>>.

ROCHETTE, P. et al. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop. **Agronomy Journal**, American Society of Agronomy, v. 88, n. 4, p. 627–635, 1996.

RUBERT, G. C. D. **VARIABILIDADE SAZONAL E CONTROLE BIOFÍSICO DA EVAPO-TRANPIRAÇÃO NA VEGETAÇÃO DO BIOMA PAMPA**. 2017. 97 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

SÁNCHEZ, J. M.; CASELLES, V.; RUBIO, E. M. Analysis of the energy balance closure over a fluxnet boreal forest in finland. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 8, p. 1487–1497, 2010. Disponível em: <<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/1487/2010/>>.

SARKAR, S.; PARAMANICK, M.; GOSWAMI, S. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (brassica napus l. var. glauca) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern india. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 1, p. 94 – 101, 2007. ISSN 0167-1987. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198706000730>>.

ŞAYLAN, L. et al. Seasonal variation of carbon dioxide fluxes over irrigated soybean (glycine max l.). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 105, n. 1, p. 277–286, Aug 2011. ISSN 1434-4483. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-011-0470-4>>.

SCHMIDT, M. et al. The carbon budget of a winter wheat field: An eddy covariance analysis of seasonal and inter-annual variability. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 165, p. 114 – 126, 2012. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819231200189X>>.

SCHMUGGE, T. J.; ANDRÉ, J.-C. **Land surface evaporation: measurement and parameterization**. [S.l.]: Springer Verlag, 1991.

SHAO, J. et al. Biotic and climatic controls on interannual variability in carbon fluxes across terrestrial ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 205, p. 11 – 22, 2015. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192315000362>>.

SHEN, Y. et al. Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the north china plain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 181, p. 133 – 142, 2013. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192313001937>>.

STAEBLER, R. M.; FITZJARRALD, D. R. Observing subcanopy co2 advection. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, n. 3, p. 139 – 156, 2004. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192303002314>>.

STOY, P. C. et al. A data-driven analysis of energy balance closure across fluxnet research sites: The role of landscape scale heterogeneity. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 171-172, p. 137 – 152, 2013. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192312003413>>.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. [S.I.]: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR Porto Alegre, 2008.

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

SUN, S.; SHAO, M.; GAO, H. Energy and co2 exchanges and influencing factors in spring wheat ecosystem along the heihe river, northwestern china. **Journal of Earth System Science**, v. 125, n. 8, p. 1667–1679, Dec 2016. ISSN 0973-774X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12040-016-0750-6>>.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 3, p. 417 – 427, 2008. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192307002663>>.

_____. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems over 8 years. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 165, p. 12 – 24, 2012. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192312001980>>.

SUYKER, A. E. et al. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, n. 3, p. 180 – 190, 2005. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192305001127>>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. [S.I.]: Universitat Jaume I, 2006. v. 10.

TIMM, A. U. et al. Energy partitioning and evapotranspiration over a rice paddy in southern brazil. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 5, p. 1975–1988, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0156.1>>.

TURNER, D. P. et al. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. **Global Change Biology**, v. 9, n. 3, p. 383–395, 2003. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2486.2003.00573.x>>.

TWINE, T. et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 3, p. 279 – 300, 2000. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192300001234>>.

VANDIJK, A. I. J. M.; DOLMAN, A. J.; SCHULZE, E.-D. Radiation, temperature, and leaf area explain ecosystem carbon fluxes in boreal and temperate european forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19, n. 2, 2005. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004GB002417>>.

VEECK, G. P. **TROCAS DE ENERGIA E MASSA NO CULTIVO DE SOJA E TRIGO NO SUL DO BRASIL**. 2018. Dissertação (Mestrado) — UFSM, 2018.

VERMA, S. B. et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, n. 1, p. 77 – 96, 2005. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192305000973>>.

VICK, E. S. et al. The surface-atmosphere exchange of carbon dioxide, water, and sensible heat across a dryland wheat-fallow rotation. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 232, p. 129 – 140, 2016. ISSN 0167-8809. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916303863>>.

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. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1997\)014<0512:QCAFSP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1997)014<0512:QCAFSP>2.0.CO;2)>.

W., R. J.; H., S. W. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus B**, v. 44, n. 2, p. 81–99, 1992. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x>>.

WAGLE, P. et al. Growing season variability in carbon dioxide exchange of irrigated and rainfed soybean in the southern united states. **Science of The Total Environment**, v. 593-594, p. 263 – 273, 2017. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971730685X>>.

WAGLE, P.; XIAO, X.; SUYKER, A. E. Estimation and analysis of gross primary production of soybean under various management practices and drought conditions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 99, p. 70 – 83, 2015. ISSN 0924-2716. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614002597>>.

WALDO, S. et al. Assessing carbon dynamics at high and low rainfall agricultural sites in the inland pacific northwest us using the eddy covariance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218-219, p. 25 – 36, 2016. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192315007844>>.

WANG, W.; LIAO, Y. cheng; GUO, Q. Seasonal and annual variations of co2 fluxes in rain-fed winter wheat agro-ecosystem of loess plateau, china. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 147 – 158, 2013. ISSN 2095-3119. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311913602154>>.

WAY, D. A.; YAMORI, W. Thermal acclimation of photosynthesis: on the importance of adjusting our definitions and accounting for thermal acclimation of respiration. **Photosynthesis Research**, v. 119, n. 1, p. 89–100, Feb 2014. ISSN 1573-5079. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11120-013-9873-7>>.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 447, p. 85–100. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49710644707>>.

WILCZAK, J. M.; ONCLEY, S. P.; STAGE, S. A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 99, n. 1, p. 127–150, Apr 2001. ISSN 1573-1472. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1018966204465>>.

WILSON, K. et al. Energy balance closure at fluxnet sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1, p. 223 – 243, 2002. ISSN 0168-1923. FLUXNET 2000 Synthesis. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192302001090>>.

WOLF, S. et al. Warm spring reduced carbon cycle impact of the 2012 us summer drought. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Academy of Sciences, v. 113, n. 21, p. 5880–5885, 2016. ISSN 0027-8424. Disponível em: <<http://www.pnas.org/content/113/21/5880>>.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface co2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern california. **Global Change Biology**, v. 7, n. 6, p. 667–677, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1354-1013.2001.00435.x>>.

YESILKOY, S. et al. Comparison of modeled and measured co2 exchanges over winter wheat in the thrace part of turkey. **FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN**, PARLAR

SCIENTIFIC PUBLICATIONS (PSP) ANGERSTR. 12, 85354 FREISING, GERMANY, v. 26, n. 1, p. 93–99, 2017.

YI, C. et al. Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 3, p. 034007, 2010. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-9326/5/i=3/a=034007>>.

YORINORI, J. T. Cancro da haste da soja: epidemiologia e controle. **EMBRAPA-CNPSO. Circular Técnica**, Londrina: EMBRAPA-CNPSO., 1996.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed research**, Wiley Online Library, v. 14, n. 6, p. 415–421, 1974.

ZERI, M. et al. Variability of carbon and water fluxes following climate extremes over a tropical forest in southwestern amazonia. **PLOS ONE**, Public Library of Science, v. 9, n. 2, p. 1–12, 02 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088130>>.

ZHANG, Y. et al. Evapotranspiration and its partitioning in an irrigated winter wheat field: A combined isotopic and micrometeorologic approach. **Journal of Hydrology**, v. 408, n. 3, p. 203 – 211, 2011. ISSN 0022-1694. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411004926>>.

ZUECCO, G. et al. A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 9, p. 1449–1466, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10681>>.