

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

Ivan Mauricio Cely Toro

**DINÂMICA DE FLUXOS DE ENERGIA E CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS  
AGRÍCOLAS COM ROTAÇÃO DE CULTURAS NO SUL DO BRASIL  
UTILIZANDO O MÉTODO EDDY COVARIANCE**

Santa Maria, RS  
2018

**Ivan Mauricio Cely Toro**

**DINÂMICA DE FLUXOS DE ENERGIA E CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS AGRÍCOLAS COM  
ROTAÇÃO DE CULTURAS NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO O MÉTODO EDDY  
COVARIANCE**

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

**ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Débora Regina Roberti**

Santa Maria, RS  
2018

**Ivan Mauricio Cely Toro**

**DINÂMICA DE FLUXOS DE ENERGIA E CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS AGRÍCOLAS COM  
ROTAÇÃO DE CULTURAS NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO O MÉTODO EDDY  
COVARIANCE**

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

**Aprovado em 27 de março de 2018:**

---

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

---

**Jackson Ernani Fiorin, Dr. (UNICRUZ)**

---

**Luca Mortarini, Dr. (UFSM; CNR - Itália)**

Santa Maria, RS  
2018

## AGRADECIMENTOS

*À meus pais María Cecilia Toro Mendoza e Luis Alberto Zabala Tique, pois, apesar das dificuldades, foram eles quem me deram a educação tanto acadêmica, como da vida, assim como seu apoio incondicional durante o tempo todo. A meu irmão "Júnior" por ter-me brindado as melhores experiências da vida e por entenderem os tantos momentos de ausência nesses últimos anos.*

*À Prof. Dra. Débora Regina Roberti pela paciência, pelo conhecimento transmitido e pelas importantes contribuições que tornaram possível a realização desta dissertação.*

*Ao Prof. Dr. Luca Mortarini, pela incalculável ajuda, interesse e orientação, assim como a grande amizade cultivada e as conversas enriquecedoras.*

*À minha muito prezada família Gabbi Azevedo. Ao Diego, pela amizade, por todos os puxões de orelha e incentivos, e Fátima, Antonio "Novo", Danúbia e Jair "Zero", por ter-me aberto as portas de sua casa e lar, recebendo-me como membro mais da família.*

*Ao meu amigo e colega de trabalho, de mestrado e de vida, Michel Baptistela Stefanello, por todos os conselhos, ensinamentos, apoio, e a minha querida amiga Khayth Marronny Rabelo Nagata pelas tantas experiências, risadas e lágrimas.*

*Aos meus fiéis amigos de estimação Luis, Emerson, Ulisses e todas aquelas pessoas que me brindarem sua amizade no Brasil.*

*A todos os colegas do Laboratório de Micrometeorología (Lµmet), em especial, aos meus colegas de equipe Ricardo "O Master", Tamíres, Vanessa, Daniele, Gisele e Marcelo, que acompanharam de perto essa jornada e cooperaram para que eu pudesse realizá-la.*

*Aos professores da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, em especial ao professor Dr. Paulo César Piquini pelas instigantes e muito agradáveis conversas durante minha estadia no Brasil.*

*À Cooperativa Central Gaúcha Ltda Tecnologia (CCGL-Tec) pela oportunidade do estudo, a autorização do experimento e utilização de suas instalações.*

*Ao Brasil e a UFSM por ser meu lar durante estes últimos anos.*

*À Organização de Estados Americanos (OEA) pela grandiosa oportunidade que me brindo de participar no programa de bolsas OEA-GCUB 2015.*

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso  
sem perder entusiasmo”*

*(Winston Churchill)*

## RESUMO

### DINÂMICA DE FLUXOS DE ENERGIA E CO<sub>2</sub> EM SISTEMAS AGRÍCOLAS COM ROTAÇÃO DE CULTURAS NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO O MÉTODO EDDY COVARIANCE

AUTOR: Ivan Mauricio Cely Toro

ORIENTADORA: Débora Regina Roberti

A análise de fluxos de carbono e calor em sistemas de cultivo é importante para entender os impactos de diferentes práticas de manejo do solo e condições meteorológicas, no contexto das mudanças climáticas, na agricultura. Se estabeleceram um par de torres de fluxo de *eddy covariance* de longo prazo na Cooperativa Central Gaúcha Ltda Tecnologia (CCGL-Tec) em Cruz Alta, no Rio Grande do Sul, Brasil. Os locais da torre têm rotação de culturas, condições climáticas e características e propriedades de solo similares, exceto nas práticas de manejo do solo. Um local está sob manejo de plantio direto (PD) desde 1985, e o outro local utiliza a prática convencional de preparo do solo (PC) no mesmo período de tempo. Medições realizadas acima de um conjunto de culturas (trigo, soja, aveia, soja) entre junho de 2011 e abril de 2013 mostraram que os locais de PD e PC atuaram como sumidouros de CO<sub>2</sub> com um fluxo cumulativo de carbono na PD entre 16 % to 30 % maior que no PC. Os valores médios e cumulativos em cada local foram significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ). Em resumo, os locais de implantação das práticas atuam como sumidouros de carbono. No entanto, o plantio direto teve maior absorção de carbono durante todo o período de medição do que o local com preparo convencional do solo, mesmo quando a análise do *footprint* foi aplicada, resultando em superestimação das porcentagens de carbono capturado pelo campo com PD. Neste trabalho se quantificam os fluxos de carbono e algumas das componentes do balanço de energia (fluxo de calor latente e sensível) para dois locais agrícolas com diferentes tipos de culturas; se aplicam dois modelos para estimar o *footprint* e observar qual deles permite selecionar a maior quantidade de dados provenientes unicamente das culturas de interesse: Se comparam os diferentes fluxos entre os locais de plantio direto e plantio convencional e se estudam as relações entre os fluxos superficiais em cada sistema de cultura.

**Palavras-chave:** Medidas de fluxo. Plantio Direto. Plantio Convencional. Footprint.

## ABSTRACT

### **DYNAMICS OF ENERGY AND CO<sub>2</sub> FLUXES IN AGRICULTURAL SYSTEMS WITH CROP ROTATION IN SOUTHERN BRAZIL USING THE EDDY COVARIANCE METHOD**

AUTHOR: Ivan Mauricio Cely Toro

ADVISOR: Débora Regina Roberti

Analysis of carbon and heat fluxes in cropping systems is important for understanding the impacts of different management practices and meteorological conditions, in the context of climate change, on agriculture. We have established a pair of long-term eddy covariance flux towers at the Cooperativa Central Gaúcha Ltda Tecnologia (CCGL-Tec) in Cruz Alta, Rio Grande do Sul, Brazil. The tower sites have similar crop rotation, weather conditions, and management practices except tillage. One site has been under no-till management (PD) since 2011, while the other site has used conventional tillage practice (PC) over the same time period. Measurements conducted above a set of crops (wheat, soybean, oat, soybean) between June 2011 and april 2013 showed the PD and PC sites acted as sinks of CO<sub>2</sub> with an cumulative flux of carbon on PD between 16 % to 30 % greater than in PC. The mean and cumulative values at each site were significantly different ( $p < 0,05$ ). Two analytical models based on analytical solutions of the advection-diffusion equation were applied to estimate the footprint and thus to identify flows from the plots of interest in the study. In summary, the site deploying no-till practices had greater uptake of carbon throughout the measurement period than conventional tillage site, even when the footprint analysis was applied resulting in overestimation of the percentages of uptaken carbon by PD. In this work are quantified the carbon flux and some of the components of the energy balance (latent and sensible heat flux) for two agricultural sites with different types of crops; two models are applied to estimate the footprint and to observe which of them allows to select the largest amount of data coming from the crops of interest only: If the different flows between the no-tillage and conventional plantings are compared and the relationships between the surface fluxes in each culture system.

**Keywords:** Flux measurements. No-till. Conventional Tillage. Footprint.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CCGL</i>	— <i>Tec</i>	Cooperativa Central Gaúcha Ltda Tecnologia (CCGL-Tec)
<i>CLC</i>		Camada limite convectiva
<i>CLE</i>		Camada limite estável ou noturna
<i>CLN</i>		Camada limite leutra
<i>CLP</i>		Camada limite planetária
<i>EC</i>		<i>Eddy covariance</i>
<i>EUA</i>		Estados Unidos da América
<i>GEE</i>		Gases de efeito estufa
<i>IIQ</i>		Intervalo interquartil
<i>LES</i>		<i>Large-eddy simulations</i>
<i>MCV</i>		Método de covariância de vórtices turbulentos
<i>TSMO</i>		Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov
<i>PC</i>		Plantio convencional
<i>PD</i>		Plantio direto
<i>Prec</i>		Precipitação
<i>RH</i>		Umidade relativa, <i>Relative Humidity</i>
<i>SI</i>		Sistema Internacional de Unidades
<i>SWC</i>		Conteúdo de água no solo, <i>Soil Water Content</i>
$T_{ar}$		Temperatura do ar
<i>VPD</i>		Déficit de pressão de vapor, <i>Vapour Pressure Deficit</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c(x, z)$	Concentração integrada do vento lateral
$C_p$	Calor específico do ar úmido ( $1013 \times 10^3 \text{J/kg}^\circ\text{C}$ )
$d$	Plano de deslocamento zero $d = \frac{2}{3}h$
$D_y$	Função de distribuição do vento lateral
$D_z$	Função de distribuição vertical
$F_c$	Fluxo de $\text{CO}_2$
$F_m$	Fluxo de momento cinemático
$f(x, z)$	Fluxo de <i>footprint</i> do vento lateral
$F(x, y, z)$	Fluxo
$g$	Aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m s}^{-2}$ )
$h$	Altura da cultura
$H$	Fluxo calor sensível
$k$	Constante de von kármán (0,4)
$K(z)$	Perfil vertical de difusividade turbulenta
$L$	Comprimento de Obukhov
$LE$	Fluxo de calor latente
$m$	Expoente da lei de potências da velocidade do vento
$n$	Expoente da lei de potências da difusividade turbulenta
$r = 2 + m - n$	Fator de forma
$T$	Temperatura do ar.
$u$	Velocidade longitudinal do vento
$u_*$	Velocidade de atrito
$\bar{u}(x)$	Velocidade efetiva da pluma
$U$	Constante na lei de potências do perfil de difusividade turbulenta
$v$	Velocidade lateral do vento
$w$	Velocidade vertical do vento
$x$	Distância na direção contrária ao vento

$z$	Altura dos sensores <i>eddy covariance</i>
$\kappa$	Constante na lei de potências da velocidade do vento
$\mu = (1 + m)/r$	Constante
$\xi(z)$	Comprimento de escala de fluxo
$\sigma$	Dispersão do vento lateral
$\phi(x, y, z)$	Fluxo de <i>footprint</i>
$\Gamma(x)$	Função Gamma
$\lambda$	Calor latente de vaporização
$\rho_a$	Densidade do ar
$\rho_c$	Densidade do CO <sub>2</sub>
$\rho_v$	Densidade de vapor d'água
$\theta_v$	Temperatura potencial virtual
–	Média temporal
'	Desviação ou flutuação turbulenta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
2.1	CAMADA LIMITE PLANETÁRIA.....	12
<b>2.1.1</b>	<b>Comprimento de Monin-Obukhov</b> .....	14
2.2	FLUXOS TURBULENTOS .....	15
<b>2.2.1</b>	<b>Técnica <i>eddy covariance</i></b> .....	15
2.3	PRÁTICAS DE MANEJO DO SOLO .....	19
<b>2.3.1</b>	<b>Plantio direto</b> .....	19
<b>2.3.2</b>	<b>Plantio convencional</b> .....	20
2.4	<i>FOOTPRINT</i> .....	21
<b>2.4.1</b>	<b>Função <i>footprint</i></b> .....	22
<b>2.4.2</b>	<b>Modelos de <i>footprint</i></b> .....	22
2.4.2.1	<i>Modelo de Kormann e Meixner (2001)</i> .....	23
2.4.2.2	<i>Modelo de Schuepp et al. (1990)</i> .....	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO SÍTIO EXPERIMENTAL.....	26
3.2	MEDIÇÕES <i>EDDY COVARIANCE</i> .....	29
<b>3.2.1</b>	<b>Instrumentação</b> .....	29
<b>3.2.2</b>	<b>Cálculo dos fluxos</b> .....	29
3.2.2.1	<i>Método de processamento de dados de fluxo de H, LE e CO<sub>2</sub> noturnos</i> .....	31
3.3	ANÁLISE DO <i>FOOTPRINT</i> .....	33
3.4	PERÍODO ANALISADO E SELEÇÃO DOS DADOS.....	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DE CONDIÇÕES .....	36
<b>4.1.1</b>	<b>Variáveis meteorológicas</b> .....	36
<b>4.1.2</b>	<b>Condições de estabilidade atmosférica</b> .....	37
4.2	ANÁLISE DO <i>FOOTPRINT</i> .....	40
4.3	ANÁLISE DOS FLUXOS DE ENERGIA E CO <sub>2</sub> .....	43
<b>4.3.1</b>	<b>Fluxos de calor e balanço de energia</b> .....	46
<b>4.3.2</b>	<b>Fluxos de CO<sub>2</sub> por cultura</b> .....	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, o estudo dos fluxos superficiais tem sido cada vez mais utilizado para entender as interações biosfera-atmosfera, com o objetivo de determinar as emissões biogênicas e quantificar a concentração de alguns gases sobre ecossistemas relevantes (NEFTTEL; SPIRIG; AMMANN, 2008). O crescente aumento por alimentos em escala global faz com que novas fronteiras agrícolas tenham sido abertas constantemente em detrimento a vegetação nativa, contribuindo com a emissão de gases de efeito estufa (como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>) e reduzindo o carbono armazenado no solo (BONDEAU et al., 2007). No entanto, as terras agrícolas podem funcionar como sumidouros do carbono dependendo da espécie da cultura, os tipos de solo, as condições meteorológicas e as práticas de manejo do solo. Por isso é de crucial importância, compreender o ciclo dos fluxos superficiais em ecossistemas agrícolas, para aproveitar o seu potencial na mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GHG, *greenhouse gases*). Estudos para diminuir a emissão desses gases pela agricultura vem sendo realizados, principalmente em relação as práticas de manejo dos distintos tipos de solo em diferentes condições meteorológicas (SCHIMEL et al., 2000; SMITH et al., 2008; SNYDER et al., 2009). Além disso, entender as possíveis influências no sistema climático devido à mudança de uso da terra é um desafio no qual medidas experimentais são de extrema importância, já que as trocas (fluxo) superficiais de massa e energia podem ser afetadas de forma significativa por estas mudanças.

Quando estamos interessados em quantificar as interações entre a superfície e a atmosfera, devido as diferentes atividades que podem contribuir diretamente na emissão de gases de efeito estufa, se devem considerar as características do local, como as condições meteorológicas, o tipo de cobertura que existe no solo e uso para o qual é destinado. Na agricultura, por exemplo, as diferenças nas práticas de manejo do solo podem ser um fator determinante no momento de analisar essas interações. No caso de campos agrícolas que tem extensões limitadas, é necessário avaliar a área que representa efetivamente as medidas das interações entre a superfície e a atmosfera, para caracterizar a cultura estudada. Neste trabalho se pretende avaliar como dois sistemas de cultura com diferentes práticas do manejo do solo afetam as medidas de fluxo quando as características e propriedades do solo são similares. Estas avaliações foram realizadas em áreas relativamente pequenas para evitar diferenças nas propriedades do solo que afetem as medições, já que estas propriedades podem variar rapidamente no espaço, alterando as trocas na *interface* solo-planta-atmosfera (NEFTTEL; SPIRIG; AMMANN, 2008).

Existem diversas técnicas para obter medidas de fluxos superficiais. A técnica *eddy covariance* (EC) (BALDOCCHI, 2003) tem sido amplamente empregada, pois facilita a medição imediata de fluxos turbulentos, alterando minimamente a transferência natural do gás entre a superfície e a atmosfera. Esta técnica permite estimar fluxos sobre áreas maiores que as tradicionais câmaras de solo, onde as informações obtidas estão confinadas em uma área fixa, delimitada pelas paredes da câmara (VESALA et al., 2008). A técnica EC estima os fluxos através da covariância entre medidas de alta frequência das componentes do vetor vento e de um escalar desejado (temperatura, concentração de água ou gases). O sistema EC é usualmente instalado em torres micrometeorológicas, detectando fluxos médios sobre grandes áreas com comprimento de 10 a 1000 vezes a altura das medições (HORST; WEIL, 1994). Esta área, também conhecida como *footprint*, define o “campo de visão” do sensor, isto é, a superfície que contribui significativamente na medida do fluxos superficiais. O *footprint* é uma função complexa que precisa ser avaliada em relação a: (i) altura em que são realizadas as medidas; (ii) rugosidade da superfície; (iii) altura e estrutura da cobertura; (iv) junto com condições mi-

crometeorológicas (velocidade e direção do vento, intensidade da turbulência e estabilidade atmosférica entre outras).

Segundo Vesala et al. (2008), o *footprint* é o cálculo necessário para conhecer a contribuição relativa de cada elemento de área na medição de fluxos verticais ou concentrações. É possível abordar este problema numericamente, com duas aproximações diferentes: (1) Métodos convencionais deterministas ou modelos analíticos, baseados na equação semi-empírica de difusão turbulenta, suposições de fechamento ou outros modelos de filtragem como grandes simulações, e (2) Modelos estocásticos, baseados tanto em simulações do campo Euleriano de velocidades aleatórias ou modelos lagrangianos baseados em simulações de trajetórias lagrangianas.

Neste trabalho, foram analisadas as trocas de energia e massa, ou seja, as componentes do balanço de energia (fluxo de calor latente e sensível) e o fluxo de CO<sub>2</sub> com dois métodos de manejo do solo para diferentes culturas agrícolas no Sul do Brasil. Foram avaliados os sistemas de plantio direto e convencional para a rotação de cultura de inverno e verão no mesmo tipo de solo. O estudo pretendeu realizar o estudo no mesmo tipo de solo e condições climáticas, por tanto as parcelas estudadas foram implantadas uma próxima da outra como foi feito por Chi et al. (2016). Deste modo, foram instaladas duas torres micrometeorológicas com sistemas de *eddy covariance*. Devido à proximidade das parcelas e dependendo das condições meteorológicas as medidas de um sistema podem estar sendo registradas pelo outro sistema. Desta forma, o processamento dos dados necessita de um estudo do *footprint* sobre cada parcela.

Aplicaram-se dois modelos analíticos para estimar o *footprint* e assim identificar os fluxos provenientes unicamente das parcelas de interesse no estudo. Os modelos usados para tal fim foram desenvolvidos por Schuepp et al. (1990) e Kormann e Meixner (2001), ambos baseados em soluções analíticas da equação advecção-difusão, sendo o primeiro, um modelo básico cujo custo em recursos computacionais não é muito alto e serve como uma primeira estimativa do *footprint* para casos de estratificação neutra. Por outro lado, o segundo modelo é mais robusto matematicamente e seus parâmetros dependem da estabilidade atmosférica, o que significa que esse modelo é mais sensível às condições micrometeorológicas que o primeiro. A importância em fazer um estudo sobre a comparação de modelos para calcular o *footprint* (FOKEN; LECLERC, 2004), reside na tentativa de explicar qual dos modelos descreve de maneira mais adequada a contribuição do sinal, oriunda da vegetação de interesse, para o posterior tratamento e análise dos fluxos medidos em pequenas áreas de cultura (WALDO et al., 2016).

Este trabalho serve como complemento para os poucos estudos encontrados na literatura (CHI et al., 2016; WALDO et al., 2016; ZERI et al., 2011), sobre a comparação entre práticas de manejo do solo em diferentes tipos de culturas, usando medidas de *eddy covariance* para avaliar os fluxos superficiais em pequenas áreas. Este estudo aborda os seguintes objetivos específicos, empregando a técnica de *eddy covariance*: (1) Quantificar o fluxo de carbono e algumas das componentes do balanço de energia (fluxo de calor latente e sensível) para dois locais agrícolas (um com plantio direto e um com plantio convencional) com diferentes tipos de culturas no período compreendido entre junho de 2011 até o abril de 2013; (2) Aplicar os modelos para estimar o *footprint* e observar qual deles permite selecionar a maior quantidade de dados provenientes unicamente das culturas de interesse. (3) Comparar os diferentes fluxos entre os locais de plantio direto e plantio convencional; (4) Compreender as relações entre os fluxos superficiais em cada sistema de cultura.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

A superfície terrestre é um limite no domínio da atmosfera. Os processos de transporte neste limite ocorrem na parte baixa da atmosfera (100 – 3000 m), dando origem à chamada Camada Limite Planetária (CLP), como se vê na Figura 2.1 (STULL, 1988). De acordo com Garratt (1992), embora não seja simples definir a CLP, existe uma definição bastante útil que a descreve como a camada diretamente acima da superfície da Terra, na qual os seus efeitos (fricção, aquecimento e esfriamento) são considerados diretamente em uma escala menor a um dia e, na qual os fluxos de *momentum*, calor e massa são carregados por movimentos turbulentos em uma escala da ordem da profundidade da camada limite, ou menor. Ou seja, tal camada é formada como consequência das interações entre a atmosfera e a superfície subjacente (terra ou água), e os principais agentes destas interações são: evaporação, transpiração, fluxos de calor, emissão de poluentes, chuvas, nuvens, etc.

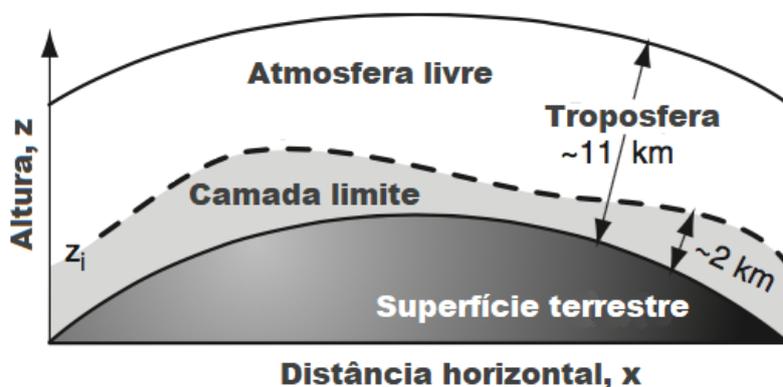


Figura 2.1 – Seção transversal vertical da Terra e troposfera mostrando a camada limite atmosférica como a parte mais baixa da troposfera.

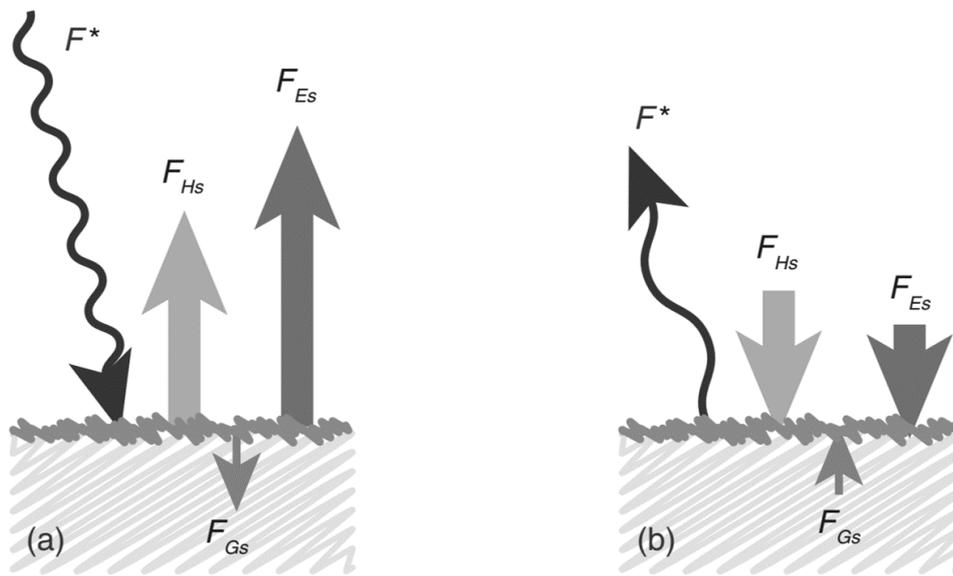
Fonte: Adaptado de Wallace e Hobbs (2006)

Segundo Pyle, Curry e Holton (2014), as principais características da CLP são:

- Manter a "ligação" entre a superfície e a atmosfera, influenciando a transferência de calor e umidade entre elas;
- Ser fundamental na determinação das propriedades do ar que entra na base das nuvens e gera as condições necessárias para a convecção da umidade;

- Ter um papel central na determinação da ocorrência de nuvens baixas e os consequentes efeitos sobre os limites de radiação;
- Reter aerossóis e poluentes;

A natureza turbulenta da CLP é uma de suas características mais importante e, está associada com a convecção térmica (produto da ascensão de parcelas de ar aquecidas pela superfície) que coexiste junto com a turbulência mecânica (gerada pela fricção de arrastre da atmosfera enquanto se desloca ao longo da irregular e rígida superfície da Terra). O processo de turbulência é o que contribui com a maioria do seu calor e toda sua água à CLP (GARRATT, 1992; KAIMAL; FINNIGAN, 1994; OKE, 2002). Pelo fato da CLP estar em contato direto com a superfície, ela sofre influência direta do solo, que consiste basicamente na troca de energia que está diretamente associada ao fluxo vertical de calor.



(a) Período diurno (fluxo positivo).

(b) Período noturno (fluxo negativo).

Figura 2.2 – Esboço de seção transversal vertical da entrada radiativa líquida para o fluxo superficial,  $F^*$  e os fluxos de calor resultantes no ar (calor latente,  $F_{Hs}$  e calor sensível,  $F_{Es}$ ) e no solo ( $F_{Gs}$ ).

Fonte: Adaptado de Wallace e Hobbs (2006).

Deste modo, quando a superfície do solo está mais aquecida do que a atmosfera, ela aquece a camada de ar imediatamente adjacente por condução e, esta por convecção aquecerá a CLP por inteiro. Portanto, pode-se afirmar que há um fluxo positivo de calor (Figura 2.2a). Porém, durante a noite, o solo passa a emitir radiação de onda longa, perdendo calor, passando então a aquecer a atmosfera. A partir de então, ocorre uma inversão no processo, ou seja, o solo atua como fonte de calor e o fluxo se torna negativo (Figura 2.2b).

A turbulência na CLP é fortemente influenciada pelo ciclo diurno de aquecimento e esfriamento da superfície, assim como pela presença de nuvens. Portanto, a estabilidade em

tal camada possuirá características diferentes de acordo com o fluxo de calor a que ela estiver exposta (MOREIRA, 2013). Segundo Garratt (1992), é possível classificá-la em três tipos principais:

- **CLC - Camada Limite Convectiva ou Inestável:** A CLC ocorre quando o forte aquecimento da superfície (devido ao sol) produz instabilidade térmica ou convecção em forma de termas e plumas, tendo como consequência um fluxo turbulento de calor sensível positivo, originando o fenômeno da turbulência;
- **CLN - Camada Limite Neutra:** As condições de estabilidade estritamente neutras raramente são encontradas na atmosfera. Os efeitos de fluatibilidade no fluxo da CLN estão ausentes, e este pode ser intimamente aproximada à atmosfera em condições ventosas com uma cobertura de nuvens completa;
- **CLE - Camada Limite Estável ou Camada Limite Noturna:** A formação da CLE ocorre após o pôr do sol, através do resfriamento radiativo da superfície da Terra. Esta ocorre na maioria dos casos (mas não exclusivamente) na noite, como resposta ao esfriamento da superfície pela emissão de onda longa ao espaço.

### 2.1.1 Comprimento de Monin-Obukhov

De acordo com Obukhov (1971), este parâmetro descreve as condições de estabilidade na camada limite. Tem dimensões de comprimento, e fornece a escala para a espessura da subcamada dinâmica acima do solo  $z$ .

É definido por

$$L = -\frac{u_*^3 \bar{\theta}_v}{kg(\overline{w'\theta'_v})_s} \quad (2.1)$$

onde  $u_*$  é a velocidade de fricção,  $\bar{\theta}_v$  é a temperatura potencial virtual média,  $(\overline{w'\theta'_v})_s$  é o fluxo de temperatura potencial virtual da superfície,  $k = 0,4$  é a constante de von Kármán. O parâmetro de estabilidade adimensional de Monin-Obukhov,  $z/L$ , tipicamente varia de  $-5$  a  $5$ , com valores positivos indicando estabilidade e valores negativos indicando instabilidade na CLP, e se aproxima a  $0$  no limite da estratificação neutra.

Pode-se afirmar que na CLP, em condições idealizadas (com céu claro e superfície homogênea), apresentam-se durante o período diurno as características da CLC, devido a que durante o dia  $L$  geralmente é negativo e o fluxo de calor sensível  $\overline{w'\theta'_v}$  é positivo sobre a Terra. De outro lado, durante a noite apresentam-se características da CLE, pois  $L$  é positivo e  $\overline{w'\theta'_v}$  é tipicamente negativo.  $L$  tende a infinito ao amanhecer e ao anoitecer quando  $\overline{w'\theta'_v}$  passa por zero, o que representa as características da CLN (FOKEN, 2006; NUNES, 2008).

É importante ressaltar que a validade de  $L$  é limitada à validade da Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO) (STULL, 1988) e suas suposições, de que: As características da superfície envolvente devem ser aproximadamente homogêneas horizontalmente, a aproximação de fluxos turbulentos constantes com altitude e que dentro da CLP o gradiente de fluxo de momentum não é negligenciável (OPTIS; MONAHAN; BOSVELD, 2016).

## 2.2 FLUXOS TURBULENTOS

O estudo dos fluxos superficiais de energia, água e carbono tem sido cada vez mais utilizado para entender as interações biosfera-atmosfera, por exemplo ante os evidentes efeitos das mudanças climáticas. O monitoramento das emissões de GEE, que estão diretamente relacionadas com o aquecimento global, é de grande importância devida ao risco iminente que representam para a humanidade, o que tem levado a procurar mecanismos para quantificar, mitigar e controlar suas concentrações na atmosfera. Vários métodos têm sido propostos na literatura para determinar estes fluxos de calor e/ou massa entre a superfície natural horizontal e a atmosfera, baseados nas equações de transferência turbulenta ou balanço de energia.

Os fluxos produzidos da interação entre a biosfera e a atmosfera, são definidos por uma magnitude medível, a densidade de fluxo, que expressa a quantidade do elemento considerado (calor ou massa) que cruza uma unidade de superfície, por unidade de tempo. No sistema internacional (SI) o fluxo de calor expressa-se em  $W m^{-2}$  e os de massa em  $kg s^{-1} m^{-2}$ . Existem diferentes métodos para medir fluxos: a técnica de *eddy covariance* (EC) baseia-se em expressões teóricas dos fluxos, ou os métodos aerodinâmico e do balanço de energias (também conhecido como método razão de Bowen, *BREB*) sustentados em expressões analíticas dos fluxos (JIMÉNEZ; LHOMME, 1990).

### 2.2.1 Técnica *eddy covariance*

A técnica *eddy covariance* ou também conhecida como método de covariância de vórtices turbulentos (MCV) é uma técnica micrometeorológica eficaz para monitorar as trocas gasosas e de escalares entre a biosfera e a atmosfera e é o método mais utilizado para estimar as trocas turbulentas na camada limite planetária (CLP).

A relação que expressa a densidade média do fluxo explica-se basicamente com ajuda das regras de decomposição de Reynolds, que estabelecem em um instante  $t$ , qualquer variável aleatória  $c(x, y, z, t)$  pode-se descompor em um valor médio  $\overline{c(x, y, z)}$  sobre o intervalo de tempo considerado e uma flutuação turbulenta  $c'(x, y, z, t)$ ,

$$c(x, y, z, t) = \overline{c(x, y, z)} + c'(x, y, z, t) \quad (2.2)$$

sendo o valor médio daquela flutuação nulo por definição  $\overline{c'(x, y, z, t)} = 0$ , (STULL, 1988).

No seu trabalho Pasquill e Smith (1983), apresenta a equação que e o ponto de partida da maioria dos tratamentos matemáticos de difusão de uma fonte como a generalização da equação clássica de condução do calor em um sólido. Esta pode ser derivada de maneira direta da equação de continuidade, que afirma que uma mudança na densidade em qualquer parte do sistema é devido à entrada e saída de material dentro e fora daquela parte do sistema. Denotando a concentração por  $c$  unidades de massa por unidade de volume do fluido, implica que a massa se conserva, assim:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} \right]$$

aplicando a decomposição de Reynolds (Equação 2.2) em ambos lados da relação anterior, se tem:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{c} + c') = - \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + u')(\bar{c} + c') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v')(\bar{c} + c') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + w')(\bar{c} + c') \right] \quad (2.3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial c'}{\partial t} = - & \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} \bar{c} + \bar{u}c' + u'\bar{c} + u'c') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} \bar{c} + \bar{v}c' + v'\bar{c} + v'c') \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} \bar{c} + \bar{w}c' + w'\bar{c} + w'c') \right] \end{aligned} \quad (2.3b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{c} + c') = - & \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} \bar{c}) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}c') + \frac{\partial}{\partial x}(u'\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial x}(u'c') \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} \bar{c}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}c') + \frac{\partial}{\partial y}(v'\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial y}(v'c') \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} \bar{c}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w}c') + \frac{\partial}{\partial z}(w'\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial z}(w'c') \right] \end{aligned} \quad (2.3c)$$

calculando a média em ambos lados da igualdade e lembrando que por definição o valor médio de uma flutuação é zero (STULL, 1988), então  $\bar{c'} = \bar{u'} = \bar{v'} = \bar{w'} = 0$  e conseqüentemente,

$$\overline{\frac{\partial}{\partial x}(u' \bar{c})} = \frac{\partial}{\partial x}(\overline{u' \bar{c}}) = \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u'} \bar{c}) = 0$$

aplicando a mesma analogia a Equação 2.3c se reduz a

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = - \left[ \boxed{\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} \bar{c})} + \boxed{\frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} \bar{c})} + \boxed{\frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} \bar{c})} + \frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'c'}) + \frac{\partial}{\partial y}(\overline{v'c'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w'c'}) \right] \quad (2.4)$$

os termos dentro das caixas da equação 2.4 podem-se expresar como

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} \bar{c}) &= \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{c} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} \bar{c}) &= \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{c} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} \bar{c}) &= \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \bar{c} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}\end{aligned}$$

reorganizando os termos da equação 2.4 e lembrando que fluido é incompressível, o que implica que  $\bar{c} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = \bar{c} \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0$  se obtêm equação 2.5 que define a conservação da massa e proporciona a estrutura teórica que permite implementar a técnica *eddy covariance*. Para qualquer substância, a equação estabelece que a soma da taxa de variação no tempo da concentração  $c$  presente na atmosfera (termo I), junto com a advecção (termo II) é balanceada pela soma da divergência de fluxo  $F$  da quantidade nas direções vertical ( $z$ ), lateral ( $y$ ) e longitudinal ( $x$ ) (termo III) e o termo de fonte ( $S_B$ ) dos processos biológicos restantes não citados na equação, tais como reações químicas (BALDOCCHI, 2003).

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{c}}{dt} &= \underbrace{\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}}_I + \underbrace{\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}}_{II} \\ &= - \left( \underbrace{\frac{\partial F_z}{\partial z} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y}}_{III} + \underbrace{S_B(x, y, z)}_{IV} \right)\end{aligned}\tag{2.5}$$

Na equação 2.5,  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$ , são as velocidades médias nas direções  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , respectivamente. Sob condições quase ideais, as concentrações escalares e velocidades do vento na atmosfera são constantes no tempo, deste modo o termo I é zero. Se a superfície subjacente é horizontalmente homogênea e está sobre um terreno plano, então não tem advecção (termo II) e as divergências de fluxo horizontal,  $\partial F_x / \partial x$  e  $\partial F_y / \partial y$ , no termo III são iguais a zero. Baseados nestas suposições, a equação de conservação simplificasse ao balanço entre a divergência de fluxo vertical da quantidade e a intensidade da fonte  $S_B$  (termo IV). O fluxo vertical pode-se apresentar como:

$$F = F_z = \overline{\rho_a w c}\tag{2.6}$$

Onde  $c = \rho_c / \rho_a$ , é a razão de mistura da substância  $c$  no ar e  $w$  é a componente vertical do vento. Utilizando a decomposição de Reynolds (equação 2.2) para cada uma das variáveis do termo direito da equação 2.6 se tem:

$$\begin{aligned}\rho_a &= \bar{\rho}_a + \rho'_a \\ w &= \bar{w} + w' \\ c &= \bar{c} + c'\end{aligned}$$

Assim,

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

abrindo os parêntesis e zerando os termos  $\overline{\rho'_a} = \overline{w'} = \overline{c'} = 0$  de acordo com a equação 2.2, que define que o valor médio de uma flutuação igual a zero.

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{c} + \bar{\rho}_a \overbrace{w' \bar{c}}^0 + \bar{\rho}_a \overbrace{w' c'}^0 + \bar{\rho}_a w' c' + \rho'_a \overbrace{w' \bar{c}}^0 + \rho'_a \bar{w} c' + \rho'_a w' \bar{c} + \rho'_a w' c')}$$

na técnica EC, as seguintes suposições são feitas. Primeiramente, as flutuações na densidade do ar podem ser negligenciáveis unicamente sobre grandes campos planos, portanto

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{c} + \bar{\rho}_a w' c' + \cancel{\rho'_a \bar{w} c'} + \cancel{\rho'_a w' \bar{c}} + \cancel{\rho'_a w' c'})}$$

segundo, o fluxo vertical médio é assumido como negligenciável para terrenos horizontalmente homogêneos, o que implica que não ocorrem divergências e convergências de fluxo ( $\bar{w} = 0$ ), daqui

$$F \approx \bar{\rho}_a \overline{w' c'} \quad (2.8)$$

Deste modo, a equação 2.8 representa o fluxo vertical turbulento que é aproximadamente igual à densidade média do ar vezes a covariância média entre as flutuações da velocidade vertical do vento e a razão de mistura. Assim a técnica EC permite avaliar fluxos a partir da variação da velocidade vertical do vento e uma magnitude medível, conforme observado nas seguintes relações:

$$LE = \lambda \overline{w' \rho'_v} \quad \text{fluxo de calor latente} \quad (2.9a)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w' T'} \quad \text{fluxo de calor sensível} \quad (2.9b)$$

$$F_c = \overline{w' \rho'_c} \quad \text{fluxo de } CO_2 \quad (2.9c)$$

onde,  $\lambda$  ( $J kg^{-1}$ ) representa o calor latente de vaporização,  $w'$  ( $m s^{-1}$ ) a flutuação instantânea da velocidade vertical do vento;  $\rho_a$ ,  $\rho_c$  e  $\rho_v$  ( $kg m^{-3}$ ) são as variações instantâneas da densidade do ar, do  $CO_2$  e do vapor d'água, respectivamente. O calor específico do ar úmido,  $C_p$

( $1013 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$ ) e  $T(^\circ\text{C})$  a variação da temperatura do ar. As barras ( $\bar{\quad}$ ) indicam as médias temporais e os apostrofes ( $\prime$ ) as flutuações turbulentas de cada magnitude em relação com sua média.

### 2.3 PRÁTICAS DE MANEJO DO SOLO

O solo é um componente essencial para os ecossistemas e ciclos naturais, e sua degradação está diretamente relacionada a problemas como falta de recursos hídricos, diminuição da biodiversidade e redução da qualidade de vida da população. No campo da agricultura, o preparo do solo abrange práticas simples e fundamentais ao bom desenvolvimento das culturas. Diferentes estratégias ou técnicas são utilizadas em conjunto para atingir altas produtividades sem, no entanto, comprometer a sustentabilidade do solo, ver Figura 2.3. A escolha da prática de manejo adequada depende de alguns fatores como a textura do solo, o grau de infestação de invasoras, os resíduos vegetais remanescentes na superfície, a umidade do solo, a existência de camadas compactadas, pedregosidade e riscos de erosão (EMBRAPA, 2013). Existem diferentes praticas de manejo do solo alguns como o plantio direto e o convencional.

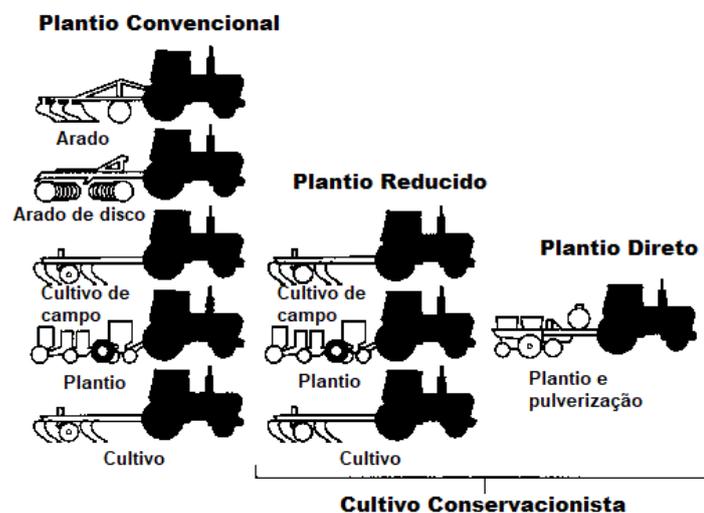


Figura 2.3 – Sistemas de plantio utilizados para a produção agrícola

Fonte: Adaptado de Goode (2015)

#### 2.3.1 Plantio direto

O plantio direto (PD) é um sistema de manejo conservacionista que visa reduzir o excessivo revolvimento do solo, mantendo os resíduos culturais na sua superfície para minimizar

o impacto sobre o meio ambiente. Segundo Kochhann e Denardin (2000), essa técnica pode ser definida como um sistema de exploração agropecuário que envolve a diversificação de espécies via rotação de culturas, as quais são estabelecidas na lavoura, mediante a mobilização de solo, exclusivamente, na linha de semeadura, mantendo-se os resíduos vegetais das culturas anteriores na superfície do solo, ver Figura 2.3. As primeiras experiências com essa técnica no Brasil objetivaram para controlar a erosão nas lavouras cultivadas com a sucessão de culturas de trigo e soja na região Sul do país. Seu início deu-se nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul, em 1970. Atualmente, está sendo adaptada e adotada em quase todas as regiões do Brasil.

O PD possibilita melhores condições de conservação de umidade para o crescimento e o desenvolvimento das culturas, minimizando os efeitos adversos causados pelo déficit hídrico (MOREIRA, 2012). Esse fato reveste-se de grande importância em face da alta ocorrência de veranicos\*, aliada à baixa capacidade de armazenamento de água no solo. O não-revolvimento do solo no PD, assim como a cobertura morta que, depositada sobre a superfície, atua como dissipadora de energia que protege o solo do impacto causado pela chuva e evita o selamento superficial, ou seja, diminui a obstrução de poros na superfície do solo, favorecendo o aumento da taxa de infiltração de água e conseqüentemente, diminuindo a erosão hídrica (SCOPEL et al., 1998). As práticas de plantio direto podem reduzir a erosão produto do vento ou à água, mantendo assim mais carbono orgânico e água no solo para manter e melhorar a qualidade do solo. De igual modo o PD reduz as emissões de CO<sub>2</sub> do solo e a evaporação em ecossistemas agrícolas (CHI et al., 2016).

### **2.3.2 Plantio convencional**

O sistema de plantio convencional (PC) consiste no revolvimento de camadas superficiais para reduzir a compactação, incorporar corretivos e fertilizantes, aumentar os espaços porosos e, com isso, elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água (FILHO et al., 2000). O revolvimento do solo promove o corte e o enterrio das plantas daninhas e auxilia no controle de pragas e patógenos do solo e, além disso, esse processo facilita o crescimento das raízes das plantas. Dessa forma o preparo convencional do solo é realizado, basicamente, com aração e gradagens. O arado efetua o corte, elevação, inversão e queda, com um efeito de esboroamento de fatias de solo denominadas de leivas. A grade complementa esse trabalho, diminuindo o tamanho dos torrões na superfície, além de nivelar o terreno, ver Figura 2.3. Entretanto, tal prática pode acarretar sérios problemas com o passar dos anos (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006).

Os sistemas convencionais de cultivo, envolvendo aração e gradagem, são considerados os de maior poder de degradação, resultando na maioria das vezes na redução dos teores de

---

\*Períodos durante o outono e inverno, onde as temperaturas máxima e mínima apresentam valores muito acima do valor climatológico normal, para estas estações (ASSIS; FERREIRA; SILVA, 2007).

matéria orgânica do solo. Segundo Bayer e Mileniczuk (1999), as perdas da matéria orgânica do solo são favorecidas, principalmente pelo revolvimento do solo e consequente destruição dos agregados, maior fragmentação e incorporação dos resíduos vegetais e diminuição da cobertura do solo, que resultam em alterações na temperatura, umidade e aeração do solo. Revolvendo-se o solo, altera-se a agregação, principalmente das argilas, que retém a maior parte dos nutrientes necessários às plantas, facilitando o seu arraste pela ação da chuva e do vento, causando erosão (MOREIRA, 2012).

Assim, os sistemas agrícolas capazes de incrementar o estoque de carbono do solo podem contribuir para a manutenção da capacidade produtiva, ao mesmo tempo em que auxiliam na mitigação do aquecimento global. Neste contexto, os sistemas conservacionistas (PD) vêm sendo apontados como importante opção de sequestro de carbono atmosférico (FRANZLUEBERS; HONS; ZUBERER, 1994; BAYER et al., 2002; WEST; POST, 2002; BOLLIGER et al., 2006). Especificamente no Brasil, destaca-se que entre as alternativas para redução das emissões de gases de efeito estufa está o incremento da área de PD, que se passar dos atuais 28 para 40 milhões  $\text{ha}^{-1}$ , em 2020, representaria uma retirada de 224 milhões de Mg de  $\text{CO}_2$  atmosférico (REBIA, 2009). A armazenagem de carbono no solo é decorrente do balanço positivo das adições, tanto na superfície pelos resíduos de culturas, como em subsuperfície, pelas raízes de plantas, em relação às perdas deste elemento. As perdas de carbono, excetuando-se a erosão, são preponderantemente na forma de  $\text{CO}_2$  devido à decomposição heterotrófica ocasionada pelos microrganismos e fauna do solo (ANDERSON, 1982; STEVENSON, 1994; FRANZLUEBERS; HONS; ZUBERER, 1994; KUZYAKOV, 2006). Os microrganismos atuam como transformadores do substrato, realizando a quebra dos polímeros orgânicos, através de enzimas extracelulares. Assim, o carbono dos resíduos vegetais é utilizado como fonte de energia para a biomassa microbiana, sendo a maior parte emitida na forma de  $\text{CO}_2$  (VARGAS; SCHOLLES, 2000; SIQUEIRA et al., 2002).

#### 2.4 FOOTPRINT

O *footprint*, define o “campo de visão” de um sensor de fluxo e descreve a influência da superfície na medição dos fluxos turbulentos (VESALA et al., 2008). A representatividade espacial do fluxo medido com a EC é determinada pela análise do *footprint*, uma ferramenta para localizar as áreas que são fonte ou sumidouro do fluxo. A estimativa do *footprint* está profundamente ligada com: a direção e a velocidade do vento, a altura do sensor, os padrões de estabilidade atmosférica e outras condições micrometeorológicas. A Figura 2.4 ilustra a contribuição do fluxo dependendo do distanciamento da torre. À área com cores vermelhas contribui mais ao fluxo medido que as áreas com cores verde, azul, e violeta. Assim, a maior parte da contribuição geralmente vem, não embaixo da torre ou a quilômetros de distância, mas sim de algum lugar intermediário como apresenta Burba e Anderson (2010) no seu trabalho.

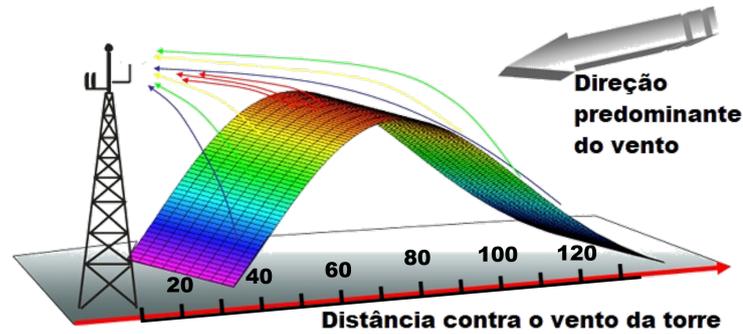


Figura 2.4 – Representação do conceito de *footprint*

Fonte: Adaptado de Global CCS Institute (2017)

### 2.4.1 Função *footprint*

A definição fundamental da função de *footprint*  $\phi$  está dada pela integral da equação de difusão (PASQUILL; SMITH, 1983). Onde o fluxo turbulento vertical  $F(0, 0, z)$ , medido na origem de um sistema horizontal de coordenadas ( $x = 0, y = 0$ ), na altura  $z$  está relacionada com o correspondente fluxo superficial  $F(x, y, z)$  (razão de emissão fonte ou sumidouro) na direção contrária ao vento da medida pontual por:

$$F(0, 0, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F(x, y, 0) \phi(x, y, z) dx dy \quad (2.10)$$

Onde o eixo  $x$  aponta na direção contrária à velocidade média horizontal do vento. A já nomeada função *footprint*  $\phi(x, y, z)$  descreve a influência de uma unidade pontual de fonte em qualquer localização da superfície  $(x, y)$  do fluxo medido em  $(0, 0, z)$ .

### 2.4.2 Modelos de *footprint*

Como consequência do crescente número de estudos de fluxos nos últimos anos, têm estimulado o desenvolvimento de diferentes modelos para estimar o *footprint*, dependendo do propósito da aplicação (SCHMID, 2002). Segundo Vesala et al. (2008), o problema do *footprint* essencialmente ocupa-se de calcular a contribuição do fluxo em certo ponto fixo na presença de uma fonte ou composto arbitrários. É possível abordar este problema numericamente, com duas aproximações diferentes: (i) Métodos convencionais deterministas ou modelos analíticos, baseados na equação semi-empírica de difusão turbulenta, suposições de fechamento ou outros modelos de filtragem tais como *Large-Eddy Simulation* (LES), e (ii) modelos estocásticos, baseados tanto em simulações do campo Euleriano de velocidades aleatórias ou modelos Lagrangianos baseados em simulações de trajetórias lagrangianas.

Estes últimos são mais complexos no sentido do custo computacional, já que são capazes de considerar topografia não ideal, heterogeneidade espacial, fluxos dentro do dossel vegetal

e condições de estabilidade extrema. No entanto, os modelos analíticos, baseados em parametrizações (semi-) empíricas que consideram condições de superfícies ideais homogêneas ou de estabilidade particulares, que por sua simplicidade servem como uma primeira estimativa do *footprint*, ver Figura 2.5.

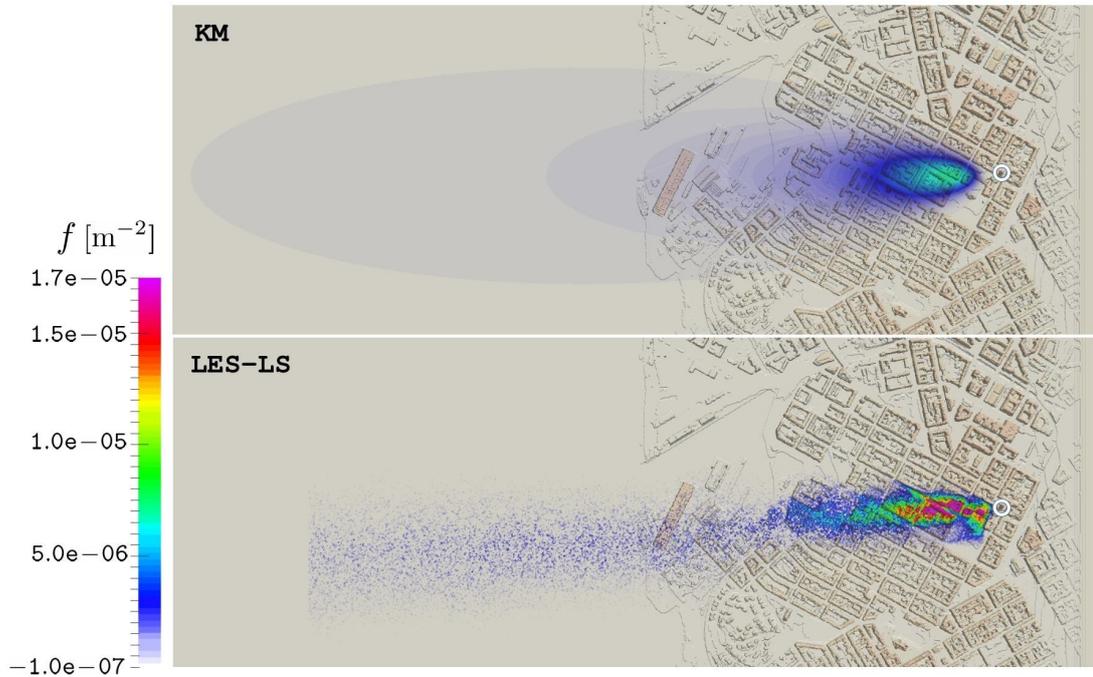


Figura 2.5 – Comparação de duas distribuições normalizadas de *footprint* sobre o modelo da topografia urbana de Helsínquia. Modelo de Kormann e Meixner (2001) (acima) e um modelo com *Large-Eddy Simulation* e partículas estocásticas lagrangianas, LES-LS (abaixo). A localização dos sensores de EC (Hotel Torni, Finlândia) é indicada com o círculo branco

Fonte: Auvinen et al. (2017)

#### 2.4.2.1 Modelo de Kormann e Meixner (2001)

O modelo Kormann e Meixner (2001) é um modelo analítico, que consiste em uma função analítica com variáveis medidas pelo sistema EC, seus parâmetros dependem da estabilidade atmosférica, o que significa que este modelo é mais sensível às condições micrometeorológicas que outros modelos. De acordo com Neftel, Spirig e Ammann (2008), o marco de referência matemático deste modelo é baseado em uma solução analítica da equação de difusão-advecção e uma estabelece o *footprint* com uma formulação de um gradiente de difusão estacionário  $\phi(x, y, z)$

$$\phi(x, y, z) = -K(z) \frac{\partial \gamma}{\partial z} = -K \frac{D_y}{\bar{u}} \frac{\partial D_z}{\partial z} \quad (2.11)$$

assumindo a não dependência da altura com a dispersão do vento lateral (2.12)

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = - \frac{\partial f}{\partial z} \quad (2.12)$$

A chave para obter a solução analítica da função *footprint* é o uso da lei de potências para a distribuição vertical dos perfis de velocidade do vento (2.13a) e de difusividade turbulenta(2.13b)

$$u(z) = Uz^m \quad (2.13a)$$

$$K(z) = \kappa z^n \quad (2.13b)$$

a equação da concentração do vento lateral integrado (por uma fonte de unidade pontual) (2.14)

$$c(x, z) = \frac{A}{z\bar{u}} \exp \left[ - \left( \frac{Bz}{z} \right)^r \right] \quad (2.14)$$

definindo o comprimento de escala do fluxo e  $\xi(u) = \frac{Uz^r}{r^2k}$  e a constante  $\mu = (1+m)/r$ , então a equação (2.14) pode ser reescrita como

$$c = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{r}{Uz^{(1+m)}} \frac{\xi^\mu}{x^\mu} e^{-\frac{\xi}{x}} \quad (2.15)$$

Finalmente, juntando a equação (2.11), com as equações (2.13a), (2.13b) e (2.15), obtêm-se

$$f = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\frac{\xi}{x}} \quad (2.16)$$

que descreve o fluxo do vento lateral integrado na distância a favor do vento  $x > 0$  e na altura  $z$  (contida em  $\xi$ ). Tomando a distribuição Gaussiana do vento lateral (2.17) de (PASQUILL; SMITH, 1983)

$$D_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.17)$$

assim é deduzido o fluxo de *footprint*,  $\phi(x, y, z) = D_y f$  necessários para resolver a equação (2.10) juntos com as equações (2.16) e (2.17).

#### 2.4.2.2 Modelo de Schuepp et al. (1990)

O termo fluxo de *footprint* foi empregado por primeira vez por Schuepp et al. (1990). Seu estudo foi o primeiro a apresentar um modelo de *footprint* diferencial definido por (2.10), para fluxos escalares sob condições de estabilidade neutras. O modelo de Schuepp et al. (1990), estima os fatores de ponderação da função *footprint* para o fluxo escalar e a concentração como soluções analíticas da equação advecção-difusão. Segundo Arriga et al. (2017), a formulação matemática deste modelo permite uma modelagem imediata e fácil de usar da função *footprint*

para períodos de meia hora usando variáveis ( $U, u^*$ ) e parâmetros ( $z_m$ ) medidos no local. Outra grande vantagem deste modelo básico é o custo insignificante em recursos computacionais e complexidades em comparação com modelos mais sofisticados como aqueles desenvolvidos com LES, o que torna uma ferramenta útil para predizer o *footprint* devido a sua simplicidade mecânica e analítica, servindo como uma primeira estimativa para tal predição.

Por outro lado, as principais limitações deste modelo são a quantificação pouco detalhada de processos que concordam com a distribuição espacial efetiva de fontes escalares (campo de vento turbulento, rugosidade superficial, topografia, etc.), superestimação de áreas-fonte para fluxos e concentrações e a restrição de validade para condições de estabilidade quase neutras.

No seu trabalho Kormann e Meixner (2001), apresenta o modelo proposto por Schuepp et al. (1990) como uma solução particular da equação (2.16), onde os expoentes da lei de potências da difusividade turbulenta e da velocidade do vento conjugada para condições de estabilidade neutras, são  $n = 1$  e  $m = 0$ , respectivamente, ver equação (2.13a). Deste modo, aplicando estas condições nos expoentes das equações (2.11), (2.13a), (2.13b) e (2.15) tem-se que o modelo unidimensional proposto por Schuepp et al. (1990) é:

$$f(x, z) = -\frac{U(z-d)}{u_* k x^2} e^{-\frac{U(z-d)}{u_* k x}} \quad (2.18)$$

onde  $U$  é a constante no perfil de lei de potências da velocidade do vento,  $z$  é a altura acima do plano de deslocamento zero  $d$  (estimado como  $\frac{2}{3}h$  para culturas agrícolas, sendo  $h$  a altura da cultura, (OKE, 2002)),  $k = 0,4$  é a constante de von Kármán. A relação 2.18 explica a contribuição relativa das fontes na direção contrária ao vento a distâncias  $x$  das medidas de fluxo no ponto  $(x, z)$ .

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO SÍTIO EXPERIMENTAL

O sítio experimental deste estudo está localizado na mesorregião do Noroeste Sul Rio-Grandense Figura 3.1, na Cooperativa Central Gaúcha Ltda Tecnologia (CCGL-Tec), Cruz Alta, RS, nas coordenadas: 28°36'2,44" S, 53°40'18,26" W, 409 m a.s.l. O sítio foi estabelecido desde 1985, como um centro de pesquisa agrícola cujo objetivo é comparar práticas de manejo do solo: O sistema de plantio direto (PD) e do convencional (PC) (TEICHRIEB, 2012).

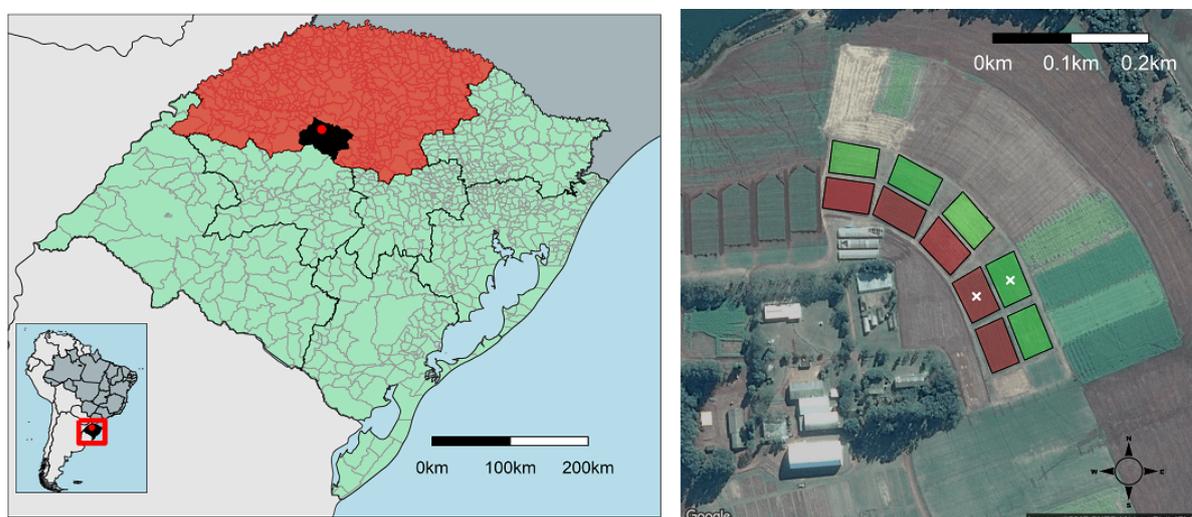


Figura 3.1 – Localização do sítio experimental de Cruz Alta - RS. Os retângulos em verde representam as parcelas com o sistema de plantio direto (PD) e os retângulos em vermelho as áreas com o plantio convencional (PC). As cruces em branco representam as torres de medição de fluxo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A montagem experimental consiste em uma matriz de dez campos ou parcelas, numeradas de 1 até 5 e distribuídas em duas colunas como mostrado nas Figuras 3.1 e 3.2, as dimensões aproximadas de cada parcela são 40 m × 60 m. Duas estações micrometeorológicas de fluxo com o sistema *eddy covariance* foram instaladas no centro dos campos número 4, para realizar o monitoramento das trocas de massa e energia entre sistemas de diferentes culturas e a atmosfera.

Em cada par de parcelas com igual numeração realizam-se experimentos com as mesmas culturas e rotação, mas com diferentes técnicas de manejo do solo. Na primeira coluna, usou-se o sistema de PC (áreas em vermelho na Figura 3.2), o qual consiste em uma lavração com arado de discos, seguido de uma gradagem leve prévia à semeadura. Na segunda coluna, foi

estabelecido o sistema de PD (áreas em verde na Figura 3.2), que consiste na implantação de culturas diretamente através dos resíduos culturais remanescentes sobre a superfície sem ou com pouca aração e gradagem do solo (OLIVEROS, 2008).

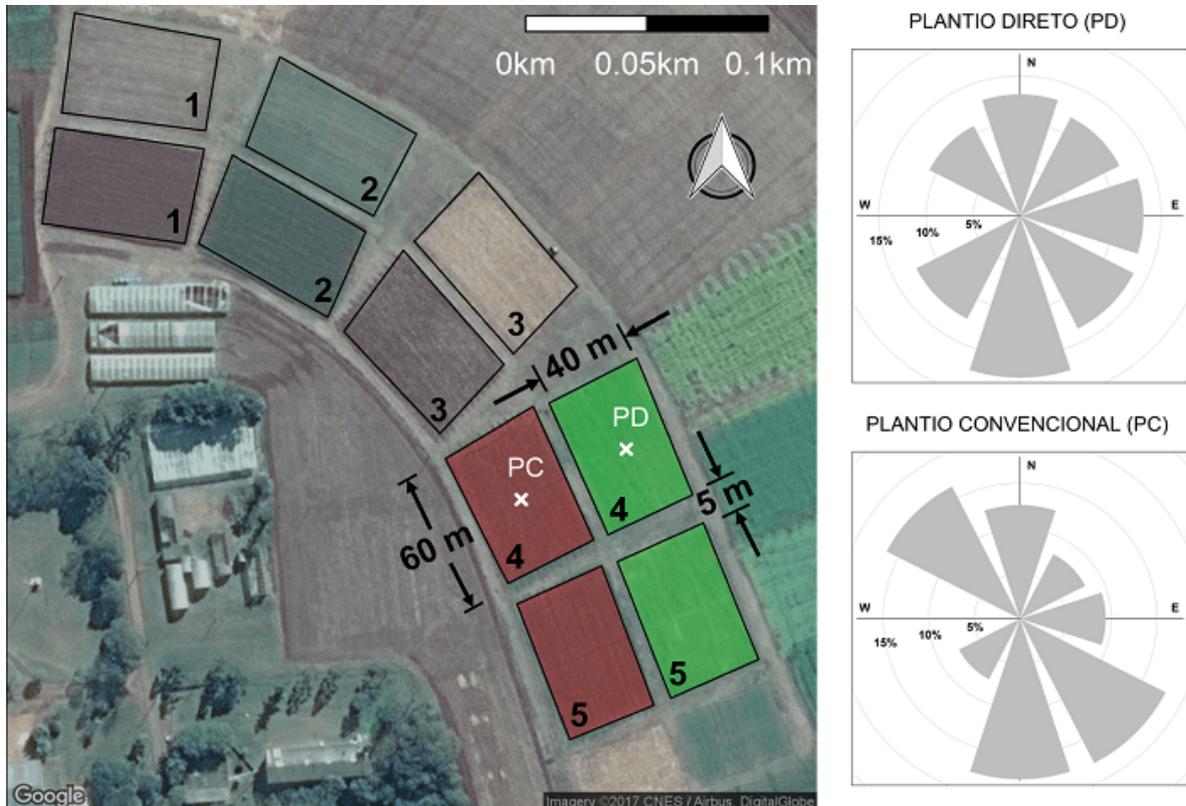


Figura 3.2 – Representação das medidas das parcelas do sítio experimental de Cruz Alta–RS. As cruzes em branco representam as torres de medição de fluxo. Os anemogramas estão baseados nas medidas da direção do vento (a escala dos gráficos representa a faixa percentual de 0% até 20%) nos sítios de PD e PC desde o 14 de junho de 2011 até o 6 de abril de 2013. Os gráficos mostram que os ventos predominantes são do sul e sudeste.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A vegetação original da região do sítio experimental era composta por floresta de araucária e pastagens naturais formadas por gramíneas, com predomínio de *paspalum notatum* antes da conversão a agricultura (TEICHRIEB, 2012). O tipo de clima é subtropical com uma temperatura média anual de 18,5 °C e precipitação anual de 1630,7 mm (médias baseadas nos registros históricos do período entre 1961 e 1990, Estação RS - Cruz Alta, Instituto Nacional de Meteorologia, INMET). O solo da área experimental pode ser classificado como Latossolo vermelho distrófico típico, com textura fraca argilosa (EMBRAPA, 2013). As direções do vento que prevalecem na região são do sul e sudeste, com ventos ocasionais provenientes do Leste, ver Figura 3.2.

O sistema de cultura conhecido como sucessão de culturas, é definido como o ordenamento de duas culturas na mesma área agrícola por tempo indeterminado, cada uma cultivada em uma estação do ano (FRANCHINI et al., 2011). Neste caso, o sistema é baseado na soja o

que significa que a rotação de cultivos consiste em culturas de soja no verão e outros cultivos no inverno, tais cultivos são plantados sobre os resíduos da soja. O Quadro 3.1 apresenta o histórico de culturas entre 2009 – 2013. Neste estudo foram utilizados os dados do período entre o inverno de 2011 até o verão de 2012. Esta escolha foi feita após estimar o *footprint* e observar a pouca quantidade de dados provenientes apenas da parcela 4. Estes dados não eram representativos para obter algum tipo de conclusão, por isso considerou-se o campo 5 que para o período tinha em ambas parcelas cultivadas as mesmas culturas, acrescentando assim uma maior quantidade de dados para análise.

Quadro 3.1 – Histórico de culturas 2009 – 2013 no sítio experimental de Cruz Alta — RS. As células em cinza representam as culturas utilizadas neste estudo. As torres estavam instaladas na parcela 4 do PC e PD.

Parcela	2009		2010		2011		2012		2013	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
1	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	
2	Trigo	Soja	Aveia	Soja	Erv.+Aveia	Milho	Trigo	Soja	Aveia	
3	Erv.+Aveia	Milho	Trigo	Soja	Aveia	Soja	Erv.+Aveia	Milho	Trigo	
4	Aveia	Soja	Erv. +Aveia	Milho	Trigo	Soja	Aveia	Soja	Erv.+Aveia	
5	Trigo	Soja	Aveia	Soja	Trigo	Soja	Aveia	Soja	Trigo	
6A	Erv.+Aveia	Milho	Trigo	Soja	Erv.+Aveia	Milho	Trigo	Soja	Erv.+Aveia	
6B	Trigo	Soja	Erv.+Aveia	Milho	Trigo	Soja	Erv.+Aveia	Milho	Trigo	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os fatores determinantes para a realização do experimento neste sítio foram: a contínua segurança do local; o monitoramento diário do funcionamento da estação e principalmente a disposição do sítio e o financiamento pela CCGL-Tec para o desenvolvimento das pesquisas. Os dados para este trabalho foram coletados em duas parcelas de sistemas de PC e PD, no período 14 de junho de 2011 até o 6 de abril de 2013, com a mesma rotação de culturas. As respectivas datas de semeadura e colheita se apreciam na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo do ciclo e classificação das culturas empregadas nos sítios de plantio direto (PD) e convencional (PC).

Cultura	Semeadura	Colheita
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	14 de junho, 2011	20 de novembro, 2011
Soja ( <i>Glycine max</i> )	5 de dezembro, 2011	4 de abril, 2012
Aveia ( <i>Avena sativa</i> )	25 de maio, 2012	24 de setembro, 2012
Soja ( <i>Glycine max</i> )	21 de novembro, 2012	6 de abril, 2013

Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois de cada colheita da soja no verão, os resíduos das culturas eram mantidos no campo das duas parcelas. O local com PC era lavrado na primavera, não se aplicaram fertilizantes em nenhuma parcela durante o período de estudo.

## 3.2 MEDIÇÕES *EDDY COVARIANCE*

### 3.2.1 Instrumentação

Os sistemas de *eddy covariance* (EC) instalados em cada sítio, consistiam de um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, EUA) e um analisador de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O infravermelho de caminho aberto (LI-7500, LICOR Biosciences, Lincoln, NE, EUA) montados em torres de estrutura metálica a uma altura de 2,5 m da superfície do solo. Os sensores foram programados para o registro/armazenamento dos dados em uma taxa de 10 Hz nos *dataloggers* (CR5000, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, EUA) para o sistema de plantio direto e (CR1000, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, EUA) para o sistema de plantio convencional.

Igualmente a torre instalada no campo de PD, registrou variáveis meteorológicas como: Radiação líquida (NR-Lite, Kipp&Zonen, Delft, Holanda) a 4,7 m, radiação solar (CMB6, Kipp&Zonen, Delft, Holanda) a 5,0 m, radiação fotossinteticamente ativa (PAR-Lite, Kipp&Zonen, Delft, Holanda) a 1,2 m, fluxo de calor no solo (HFP01SC, Hukseflux Thermal Sensors, Delft, Holanda) à profundidade de 0,04 e 0,01 m, temperatura do solo (T108, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, EUA) e (TCAV Tipo E, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, EUA) à profundidade de 0,03 e 0,04 m respectivamente, conteúdo de água no solo (CS616, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, EUA) de 0,0 – 0,3 m de profundidade. No campo do PC também tinha instalado um sensor de conteúdo de água no solo (CS616, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, EUA) de 0,0 – 0,3 m de profundidade.

### 3.2.2 Cálculo dos fluxos

Os instrumentos descritos anteriormente são os tipicamente empregados em sistemas de *eddy covariance* para a medição fluxo de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, e sua operação tem sido amplamente descrita na literatura em trabalhos como Aubinet et al. (2000), Massman, Lee e Law (2004). Os fluxos micrometeorológicos foram calculados como covariâncias entre os escalares (temperatura ou razão de mistura) e a velocidade vertical do vento de acordo com procedimentos comumente aceitos. Deste modo, o fluxo de CO<sub>2</sub> e vapor de água é dado por Webb, Pearman e Leuning (1980)

$$F_c = \overline{\rho_a} \overline{w'c'} \quad (3.1)$$

onde  $c'$  e  $w'$  são os desvios instantâneos dos valores médios no tempo da razão de mistura e componente vertical do vento, respectivamente, e  $\overline{\rho_a}$  é a densidade média do ar seco. No entanto, os instrumentos não medem a razão de mistura  $c'$ , então uma suposição prática é  $F_c = \overline{w'\rho'_a}$ , (BURBA; ANDERSON, 2010). A barra acima do produto das flutuações denota

a média temporal. Da mesma forma, o calor sensível e os fluxos de momento cinemático são

$$H = \rho_a C_p \overline{w' T'} \quad (3.2)$$

$$F_m = \overline{u' w'} \quad (3.3)$$

onde  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante,  $T'$  é a flutuação da temperatura e  $u'$  é a flutuação do componente do vento horizontal. Os fluxos ascendentes foram definidos como positivos. O fluxo de calor latente (LE) foi obtido pela multiplicação do fluxo de vapor d'água  $\rho_v$  pelo calor latente de vaporização d'água  $\lambda$

$$LE = \lambda \overline{w' \rho'_v} \quad (3.4)$$

os fluxos de momento e calor e de  $CO_2$  foram calculados em média em períodos de 30 minutos.

Os dados de alta frequência (10 Hz) foram processados no software LI-COR EddyPro<sup>®</sup> (versão 4.2.0, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA), para gerar séries de dados a cada 30 min. O software aplica as seguintes técnicas de correção e controle de qualidade: Detecção e remoção de *spikes*, filtragem por limites absolutos e filtragem por intensidade do sinal de  $CO_2$  e  $H_2O$  abaixo de 90 %. A rotação 2-D foi realizada para alinhar o sistema de coordenadas com a velocidade do vento principal e assim fazer a velocidade média vertical zero (KAIMAL; FINNIGAN, 1994). A correção do fluxo causada pela transferência de vapor de água foi realizada de acordo com Webb, Pearman e Leuning (1980). Uma descrição mais detalhada do processamento dos dados pode-se encontrar em Waldo et al. (2016).

Os dados de fluxo calculados de meia hora, podem apresentar *spikes* devido a medidas meteorológicas não realísticas. O primeiro controle de qualidade consistiu em verificar os dados para valores que estavam fora de uma variação razoável, para isto foi empregado o intervalo interquartil (IIQ) nos dados de fluxo, com objetivo de avaliar o grau de espalhamento de dados (dispersão) em torno da medida de centralidade, ver Figura 3.3. Deste modo, estabeleceram-se os limites para os fluxos como:  $-100 < H < 400 \text{ W m}^{-2}$ ,  $-100 < LE < 600 \text{ W m}^{-2}$ ,  $-50 < CO_2 < 30 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Aqui se apresentam os dados do PD, resultado similar se teve no PC.

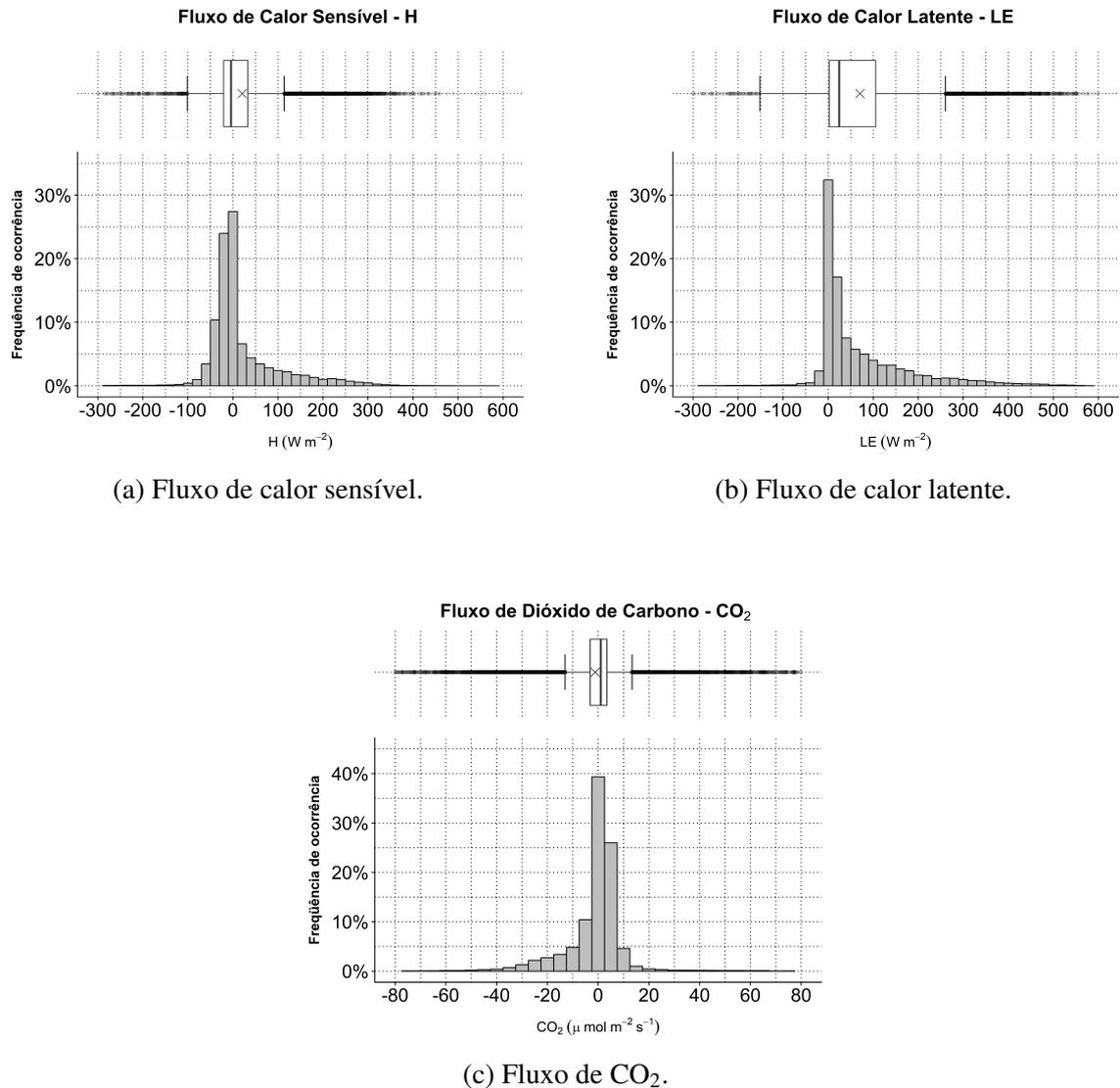


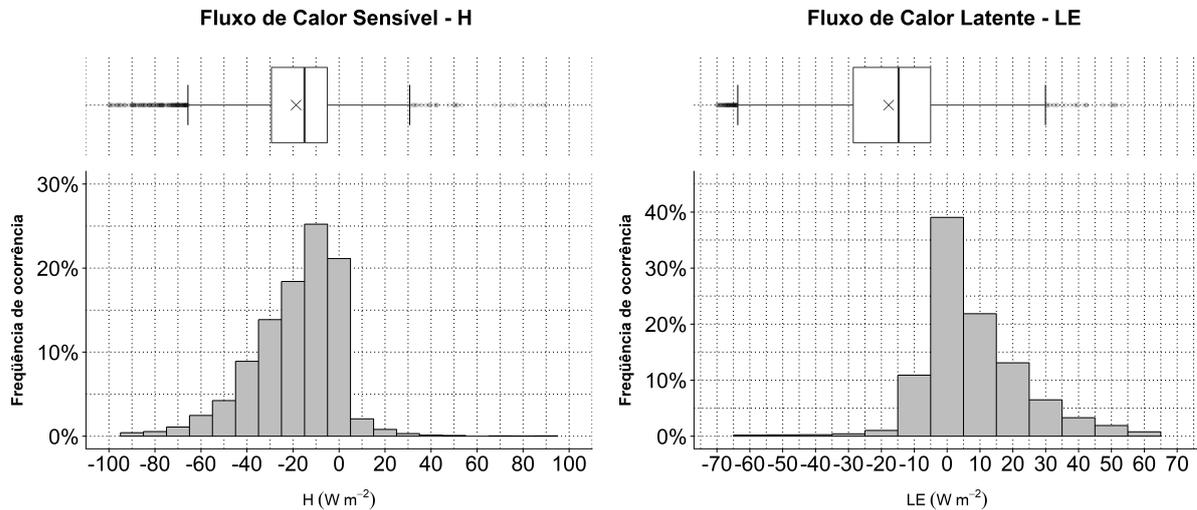
Figura 3.3 – Distribuição relativa de frequências dos fluxos de: (a) calor sensível, (b) latente y (c) CO<sub>2</sub> de junho de 2011 até setembro de 2012. A maior ocorrência de dados é normalizada para a unidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2.1 Método de processamento de dados de fluxo de H, LE e CO<sub>2</sub> noturnos

A segunda etapa no processamento dos dados consiste em as correções dos fluxos noturnos de H, LE e CO<sub>2</sub> baseados em análises estatísticas. No caso dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) o método empregado para remover os *spikes*, foi estabelecer os limites empregando o IIQ igualmente que na seção anterior, o período noturno foi definido como aquele

intervalo de tempo no qual a radiação solar ( $R_g$ ) é menor que  $1 \text{ W/m}^2$  (CHI et al., 2016). Deste modo, estabeleceram-se os limites para os fluxos turbulentos como:  $-100 < H < 20 \text{ W m}^{-2}$ ,  $-20 < LE < 60 \text{ W m}^{-2}$ , Ver Figura 3.4.



(a) Fluxo de calor sensível noturno.

(b) Fluxo de calor latente noturno.

Figura 3.4 – Distribuição relativa de frequências dos fluxos de: (a) calor sensível e (b) latente noturnos de junho de 2011 até setembro de 2012. A maior ocorrência de dados é normalizada para a unidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A medição de fluxos com a técnica EC durante a noite, torna-se complicada e incerta por causa da baixa turbulência e da estratificação do ar relativamente estável. O método padrão para processar dados de fluxo de  $\text{CO}_2$  noturnos é avaliar principalmente a qualidade dos dados de fluxo noturnos usando o limite da velocidade de fricção (RODDA et al., 2016). Devido à baixa velocidade de fricção ( $u_*$ ) que corresponde a noites calmas,  $u_*$  é usado para identificar os dados de fluxo como baixa turbulência e os dados de fluxo confiáveis como descrito por Aubinet, Vesala e Papale (2012).

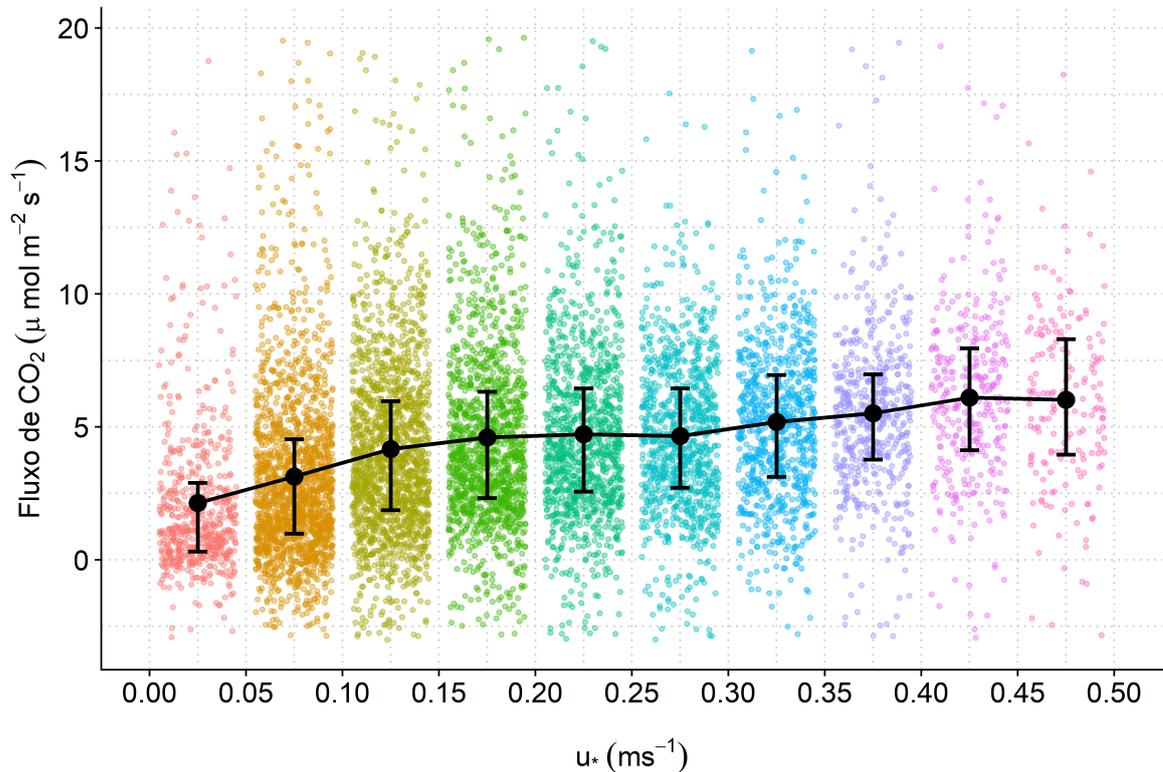


Figura 3.5 – Relação do fluxo de CO<sub>2</sub> noturno com o a velocidade de atrito ( $u_*$ ), onde as cores indicam as diferentes classes de magnitude do  $u_*$ . Os pontos representam a média de cada grupo e as barras de error o primeiro quartil (inferior) e o terceiro quartil (superior).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.5 mostra a relação entre o fluxo de CO<sub>2</sub> noturno e o desvio da velocidade de fricção  $u_*$ , obtido a partir dos dados do PC (resultado semelhante obteve-se para o PD). Para este trabalho se determinou que o limite de  $u_*$  era  $0,15 \text{ m s}^{-1}$ .

No período de estudo (14 de junho de 2011 até 6 de abril de 2013) o sistema de EC instalado em cada parcela registra 37 730 dados em intervalos de 30 min. Aproximadamente 25 % e 37 % desses dados nos sistemas de PC e PD, respectivamente foram removidos no processo de limpeza, devido às correções nas medições meteorológicas com ordens de magnitude fisicamente não reais, perdas de energia pelas limitações do sistema de subministro de energia, correções dos fluxos noturnos e remoção de *spikes* ou problemas técnicos nos equipamentos.

### 3.3 ANÁLISE DO FOOTPRINT

A análise do *footprint* foi realizada usando os modelos analíticos de Schuepp et al. (1990) e Kormann e Meixner (2001). Ambos modelos tornaram-se amplamente utilizados e integrados em software de EC, por exemplo LI-COR EddyPro<sup>®</sup> ou Campbell EasyFlux<sup>™</sup>, e sua

validade é restrita, estritamente falando, apenas às medidas realizadas em uma superfície homogênea estendida com cobertura de vegetação relativamente pequena. Igualmente, assumiu-se para os dois modelos condições de estratificação neutra uma vez que os cálculos do *footprint* para o modelo de Schuepp et al. (1990) são válidos somente nestas condições, pois para casos estáveis estas estimativas são mais imprecisas. Por tanto, a suposição da estratificação neutra fornece estimativas confiáveis para casos instáveis no cálculo do *footprint* (VESALA et al., 2006).

Esta análise foi usada para identificar os casos em que os fluxos correspondiam a uma área fora dos limites de cada parcela. Os dois modelos foram aplicados nos sítios experimentais da Figura 3.1, cujas direções do vento principais podem ser observados na Figura 3.2. Aqui, os modelos foram usados para calcular a distância onde a contribuição acumulada do fluxo atingiu 70 % do total, para cada fluxo de meia hora. Se essa distância excedesse as bordas da parcela, os dados eram removidos do mesmo modo que foi feito no trabalho de Zeri et al. (2011).

### 3.4 PERÍODO ANALISADO E SELEÇÃO DOS DADOS

As medições com a técnica EC, começaram no 14 de junho de 2011 com a semeadura do trigo e terminaram no 6 de abril de 2013, com a colheita da soja, ver Quadro 3.2. O sistema de cultura aplicado foi o de sucessão de culturas baseado na soja o que consiste na rotação de cultivos soja no verão e outros cultivos no inverno, sendo estes últimos plantados sobre os resíduos da soja.

Foi efetuada a rotação 3D nas componentes do vento (MCMILLEN, 1988), deste modo, o dia 06 de setembro de 2012 foi criado um novo padrão para as duas torres micrometeorológicas, por tal motivo as componentes  $u$  e  $v$  do vento foram modificadas para coincidir  $u$  com a direção do vento médio (leste) e  $v$  com a direção transversal (norte). Com o objetivo de evitar as distorções de fluxo produto da estrutura da torre, aqueles dados do vento provenientes das direções ( $247^\circ$  -  $292^\circ$ ) foram omitidas, ver Figura 3.2. Na filtragem de dados, foram removidos os dados não físicos (*spikes*) que ocorrem principalmente devido à precipitação, aves que pousam no sensor ou muito próximo dele e mau funcionamento do sensor. As fontes de erro relacionadas com às medidas de EC, como a turbulência subdesenvolvida, falta de estacionariedade, efeitos de fluatibilidade e não sincronia entre sensores foram marcadas como dado baixa qualidade por EddyPro<sup>®</sup>.

Os algoritmos e gráficos utilizados neste trabalho foram escritos na linguagem R (R Core Team, 2017), e se empregaram os pacotes *FREddyPro* (XENAKIS, 2016), para o análise do *footprint* de ambos modelos e *ggplot2* para a elaboração dos gráficos (WICKHAM, 2009).

Quadro 3.2 – Resumo das atividades de gestão nos dois locais monitorados

<b>Data</b>	<b>Atividade</b>
14 de junho de 2011	Semeadura do trigo
20 de novembro de 2011	Colheita do trigo
2 de dezembro de 2011	Aração*, gradagem*, dessecação
5 de dezembro de 2011	Semeadura da soja
13 de dezembro de 2011	Emergência da soja
4 de abril de 2012	Colheita da soja
2 de maio de 2012	Aração*
4 de maio de 2012	Gradagem*
17 de maio de 2012	Dessecação
25 de maio de 2012	Semeadura da aveia
17 de setembro de 2012	Manejo da aveia com rolo-faca
15 de novembro de 2012	Aração*
16 de novembro de 2012	Gradagem*
21 de novembro de 2012	Dessecação
21 de novembro de 2012	Semeadura da soja
6 de abril de 2013	Colheita da soja

Fonte: Elaborado pelo autor.

---

\*Estas etapas somente foram aplicadas no PC

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DE CONDIÇÕES

#### 4.1.1 Variáveis meteorológicas

Para melhor compreensão dos resultados obtidos neste trabalho é necessário fazer uma análise das condições climáticas de todo o período de experimento. Uma vez que as torres instaladas nos sistemas de PC e PD estavam a aproximadamente 50 m uma da outra, as diferenças médias anuais da velocidade do vento ( $U$ ), temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), precipitação ( $Prec$ ), umidade relativa ( $UR$ ), e radiação global ( $R_g$ ) não foram significativas entre os dois locais. Por simplicidade, somente as variáveis meteorológicas medidas no sítio de PC são ilustradas na Figura 4.1. Os dados de  $T_{ar}$ ,  $Prec$  e  $UR$  foram obtidos através da estação automática do INMET-A853 a 400 m do sítio de estudo, e as demais variáveis foram medidas nas estações micrometeorológicas do sítio experimental.

Durante o período observado a velocidade do vento mostrou valores e variações típicas, com uma média de  $3,12 \text{ m s}^{-1}$  a 2,5 m de altura. No entanto, foram registradas algumas rajadas (ventos súbitos de curta duração e elevada velocidade) atingindo velocidades de até  $13,20 \text{ m s}^{-1}$  observados na Figura 4.1, o mesmo ocorre nos dados do INMET. Na Figura 3.2 verificamos que os ventos predominantes são nas direções sul (15 %) e sudeste (18 %) nos sistemas PD e PC, respectivamente. No entanto, a variabilidade direcional e da intensidade dos ventos podem estar limitadas em sua grande maioria nas direções noroeste e sul no sistema de PC devido a sua proximidade com os prédios da CCGL-Tec, localizados à aproximadamente 200 m ao Oeste do sítio, interferindo no movimento do ar em suas proximidades. Esta interferência não foi evidente no sistema PD, já que a geometria deste sítio proporcionava maior liberdade de movimento as correntes de ar devido à menor proximidade com as construções.

Os dados de  $T_{ar}$ ,  $R_g$  e  $Prec$  claramente refletem o clima típico desta região: o verão é usualmente quente e úmido com precipitações bem distribuídas ao longo do ano, no entanto, em março de 2012 foram mais intensas chegando a 757 mm, segundo o INMET (2017). A temperatura do ar (Figura 4.1) também variou significativamente no seu ciclo diário, registrando valores entre  $-2,9^\circ\text{C}$  e  $36,7^\circ\text{C}$  com uma média diária de  $18,5^\circ\text{C}$  a 2,5 m de altura para o período. A  $UR$  média foi 73 % e variou entre 50 % e 100 %, durante os quase 2 anos. Geralmente, a  $UR$  máxima era seguida de uma temperatura mínima do ar e vice-versa, no entanto, vale ressaltar que  $UR$  é influenciada por outros fatores como precipitação, fluxos produzidos por advecções, transpiração e intensidade turbulenta (LI et al., 2017).

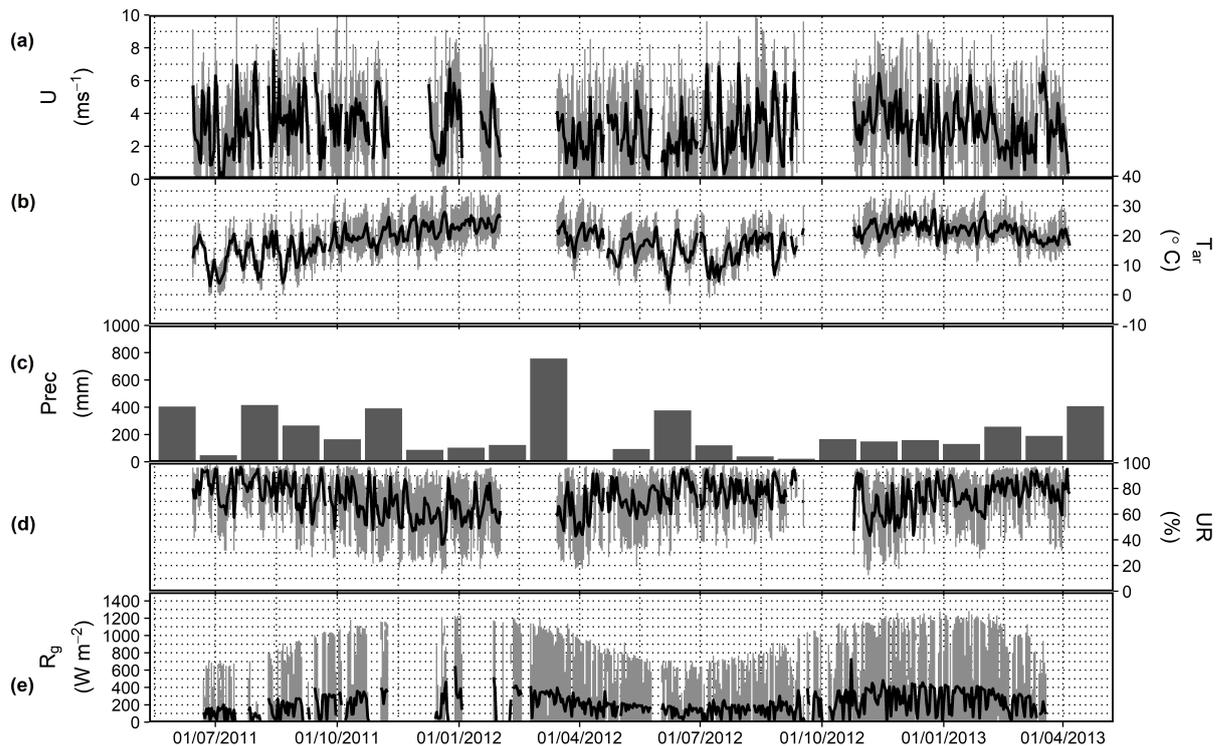


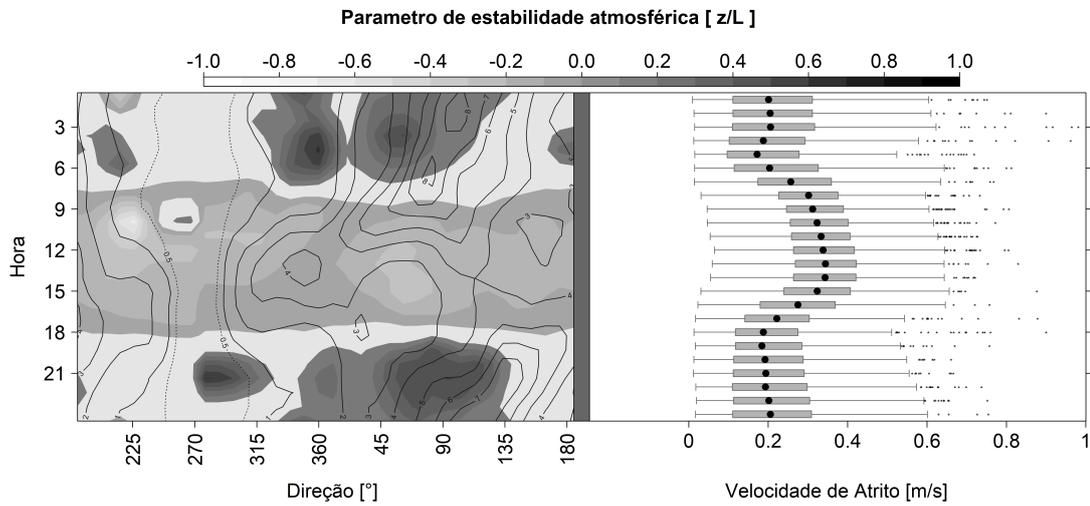
Figura 4.1 – Medidas meteorológicas do 14 de junho de 2011 até o 6 de abril de 2013. (a) Velocidade do vento ( $U$ ), (b) temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), (c) precipitação (mm), as barras do diagrama representam as médias mensais, (d) umidade relativa (UR) obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017), (e) radiação global ( $R_g$ ) do sistema de plantio convencional, os dados são apresentados em séries de 30 min (linhas em cinza) e as suas respectivas médias diárias (linhas em preto).

Fonte: Elaborado pelo autor.

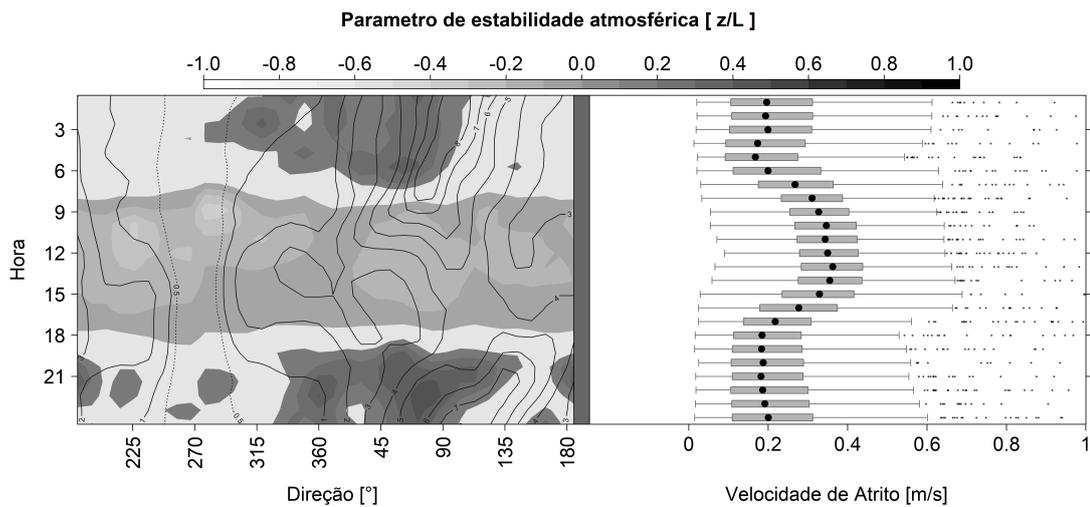
#### 4.1.2 Condições de estabilidade atmosférica

O parâmetro adimensional de estabilidade de Obukhov ( $z/L$ ) pode ser obtido diretamente do número do fluxo Richardson ao aproximar o gradiente de velocidade do vento  $du/dz$  a  $u_* / kz$  e geralmente varia de  $-5$  até  $5$ , com valores positivos indicando estratificação estável, negativos instável, e se aproxima no limite a  $0$  estratificação neutra (FOKEN, 2006). O modelo estatístico padrão, que inclui a teoria da similaridade Monin-Obukhov, propõe o parâmetro  $z/L$  como uma medida válida de estabilidade para somente os primeiros 10% da CLP (STULL, 1988). No entanto, segundo Mahrt (1998), análises mais minuciosas de dados da camada superficial sugerem a existência de outros regimes de estratificação mais complexos (como se apresentam no trabalho de Smedman et al. (2007)), que não se podem caracterizar com este parâmetro. Quando  $L \rightarrow \infty$  (ou, equivalentemente  $z/L \rightarrow 0$ ) a CLP está em condições de estabilidade neutras. O período neutro muitas vezes é bastante curto (da ordem de vários minutos, geralmente ocorrem perto de nascer e pôr do sol), isto implica desafios adicionais

em termos de convergência estatística durante as condições estabilidade neutra assim como sua individualização precisa (METZGER; MCKEON; HOLMES, 2007).



(a) Sistema de PC.



(b) Sistema de PD.

Figura 4.2 – Variação do parâmetro de estabilidade ( $z/L$ ) nos sítios com sistemas de (a) plantio convencional e (b) plantio direto. Os gráficos de contorno na esquerda representam a frequência percentual do parâmetro de estabilidade por hora do dia e direção do vento, enquanto os gráficos na direita mostram a variação diurna da velocidade de fricção.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise das condições de estabilidade atmosférica foi necessária, pois dependendo de suas características os seus resultados na estimativa do *footprint* poderiam ser alterados, por exemplo, no modelo proposto por Schuepp et al. (1990), para valores do parâmetro de estabilidade  $z/L < -0,2$  (que representa condições de estabilidade instáveis), a pluma que representa a função *footprint* pode apresentar alterações na sua localização ou sua intensidade tendo reper-

cussões significativas, levando a erros na análise.

No horário diurno (entre às 8 e 18 horas) o parâmetro de estabilidade registra valores no intervalo  $-0,3 < z/L < 0,1$  com uniformidade em todas as direções, como se observa no lado esquerdo nas Figuras 4.2a e 4.2b. Isto é consequência do aquecimento da superfície, que produz instabilidade térmica, originando turbulência e assim condições de instabilidade na atmosfera. Por outro lado, durante à noite, especialmente em dias com pouco vento ou nuvens, ocorre o resfriamento radiativo da superfície da Terra com maior facilidade, pela emissão de onda longa ao espaço, impedindo a circulação vertical das massas de ar e destruindo a turbulência, por tanto gerando condições de estabilidade na atmosfera (representados como as áreas mais obscuras das Figuras 4.2a e 4.2b). No lado direito se observa a variação horária da velocidade de fricção, o aumento de  $u_*$  geralmente está relacionado ao aumento da energia dos turbilhões térmicos que ocorrem durante o dia devido ao aquecimento superficial (perto do meio dia quando a radiação incidente é maior), como ocorre em dias de céu claro. No entanto, este aumento de  $u_*$  também pode ser devido ao aumento da turbulência mecânica em um dia ventoso forte. Os diagramas de caixa refletem o intervalo entre o percentil 25 % e 75 %, enquanto os fios de bigodes indicam o percentil 5 % e 95 %. Também são mostradas as médias (pontos pretos), bem como valores discrepantes (asteriscos).

Deste modo, neste trabalho foram identificados os períodos de tempo onde as condições da atmosfera se classificavam como “quase-neutras”, exigência indispensável para a aplicação do modelo de *footprint* proposto por Schuepp et al. (1990). Para isso usou-se o critério  $|z/L| < 0,1$  planteado por Högström (1988), com o objetivo de minimizar a potencial contaminação da análise de turbulência por efeitos de flutuabilidade. Existem trabalhos similares onde se explica como foi estimado o critério para definir condições de estabilidade quase-neutras para o oceano, como apresentam Hsu, Meindl e Gilhousen (1994).

A Figura 4.3, representa a distribuição de frequências do parâmetro de estabilidade de Obukhov do conjunto de dados registrados a cada 30 min durante todo o período de estudo, nos dois sistemas de plantio. As áreas em cinza, representam o intervalo onde as condições de estabilidade são quase-neutras, como foi proposto por Högström (1988). Como se pode observar para ambos sistemas (Figuras 4.3a e 4.3b) aproximadamente 75 % do total dos registros de  $z/L$  estão neste intervalo. Em princípio, os resultados anteriores foram plausíveis para a aplicação do modelo de estimativa do *footprint* desenvolvido por Schuepp et al. (1990), pois as condições de estabilidade atmosféricas podem se catalogar como quase-neutras.

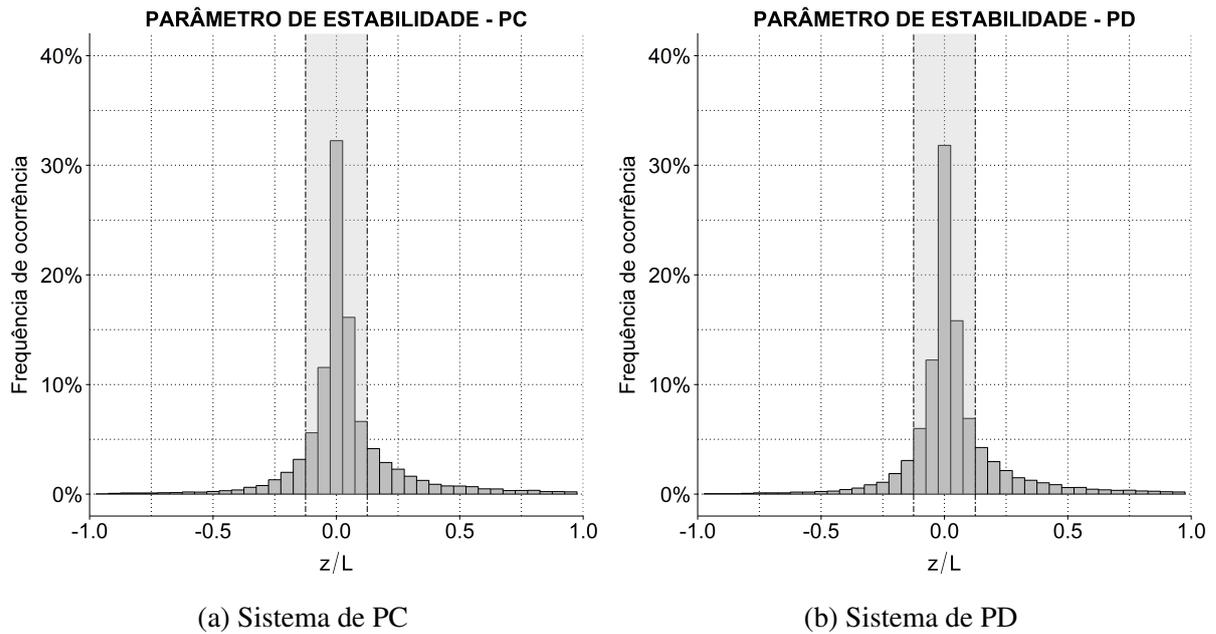


Figura 4.3 – Distribuição relativa de frequências do parâmetro de estabilidade de Obukhov ( $z/L$ ) nos sítios com sistemas de (a) plantio convencional e (b) plantio direto. A área em cinza representa o intervalo proposto por Högström (1988),  $-0,1 < z/L < 0,1$ , para classificar as condições de estabilidade atmosféricas como quase-neutras. A maior ocorrência de dados é normalizada para a unidade.

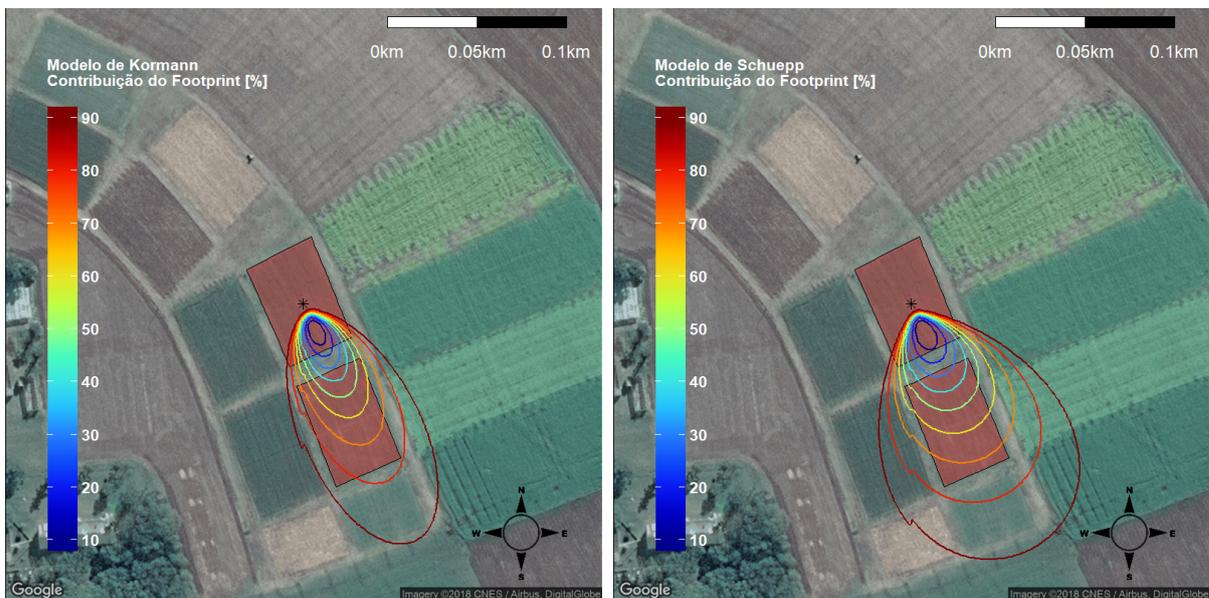
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 ANÁLISE DO *FOOTPRINT*

Para determinar o campo de visão dos sensores de fluxo no sítio experimental de Cruz Alta, foram aplicados os modelos de Schuepp et al. (1990) e Kormann e Meixner (2001). Por se estudar culturas agrícolas foi importante levar em conta as respectivas alturas no transcórper do tempo para estimar o *footprint*. Isto porque a medida que as culturas crescem a vegetação do dossel fica mais próxima aos sensores, mudando o perfil de vento (relacionado profundamente com plano de deslocamento zero, estimado como  $d = \frac{2}{3}h$  para culturas agrícolas de altura  $h$ ), e consequentemente alterando a pluma que descreve o *footprint*. É muito importante esta consideração para minimizar as situações onde a área medida pela instrumentação se estende além das bordas das parcelas. Deste modo, durante o estudo no sítio experimental foram feitos registros da altura das culturas de maneira esporádica, que logo se extrapolaram aos dados de cada média hora empregando um modelo lineal.

A primeira comparação dos modelos de *footprint* consistiu em uma análise qualitativa como se ve na Figura 4.4. Se avaliaram ambos modelos para situações representativas do sítio experimental, justamente foram consideradas as médias aritméticas de todo o período de

estudo dos parâmetros envolvidos na estimativa do *footprint*, resultando  $u_* = 0,25 \text{ ms}^{-1}$ ,  $z_m/L = 0,08$ ,  $U = 2,48 \text{ ms}^{-1}$  a partir dos dados de PD (resultado similar se obteve no PC). Note-se que a pluma que descreve o campo de visão do sensor com o modelo de Schuepp et al. (1990) super-estima a área de interesse em nosso estudo, dificultando a filtragem dos dados oriundos unicamente das parcelas de PD; como se observa atinge um pouco mais da metade da parcela onde esta instalado o sistema de PC. Para o modelo de Kormann e Meixner (2001) a contribuição dos fluxos que captam os sensores provenientes das culturas (áreas em vermelho das Figuras 4.4a e 4.4b) foi de aproximadamente 73,30 %, enquanto para o modelo de Schuepp et al. (1990) foi de 68,20 %.



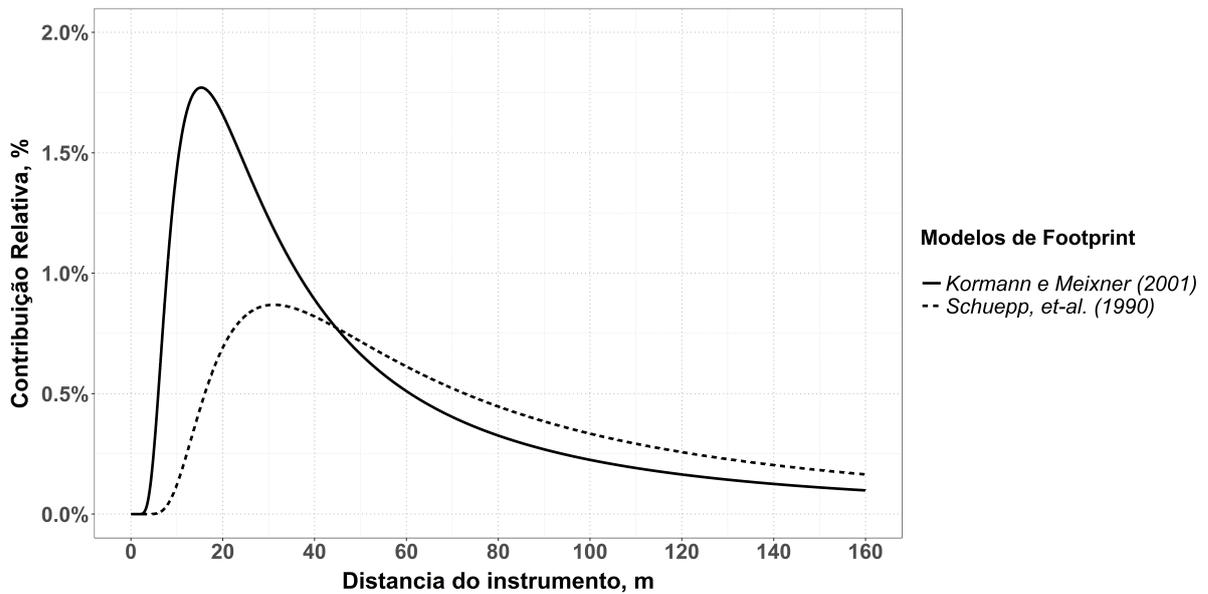
(a) Modelo de Kormann e Meixner (2001)

(b) Modelo de Schuepp et al. (1990)

Figura 4.4 – Comparação de dois modelos de *footprint* para condições de estratificação atmosférica quase-neutras ( $u_* = 0,25 \text{ ms}^{-1}$ ;  $z_m/L = 0,08$ ;  $U = 2,48 \text{ ms}^{-1}$ ) a 2,5 m de altura. As isolinhas representam 10 – 90 % da contribuição. O asterisco denota a localização da torre.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicar este modelo implicou no aumento considerável da quantidade de dados perdidos e falhas, sendo que no momento de calcular a contribuição acumulada para cada fluxo de meia hora dentro das bordas das parcelas, contribuições inferiores a 70 % do total foram removidos os dados. Em síntese, quando se trabalha com áreas e pequenas bem definidas, como são as parcelas deste estudo, se infere que a pluma do *footprint* é mais “fechada” ou seja, grande parte de sua superfície cobre a maior quantidade de área possível de cada cultura, descrevendo melhor a contribuição dos fluxos, sem ter uma considerável perda de dados diminuindo o erro devido a esse processo.



(a) Fluxo de calor sensível.

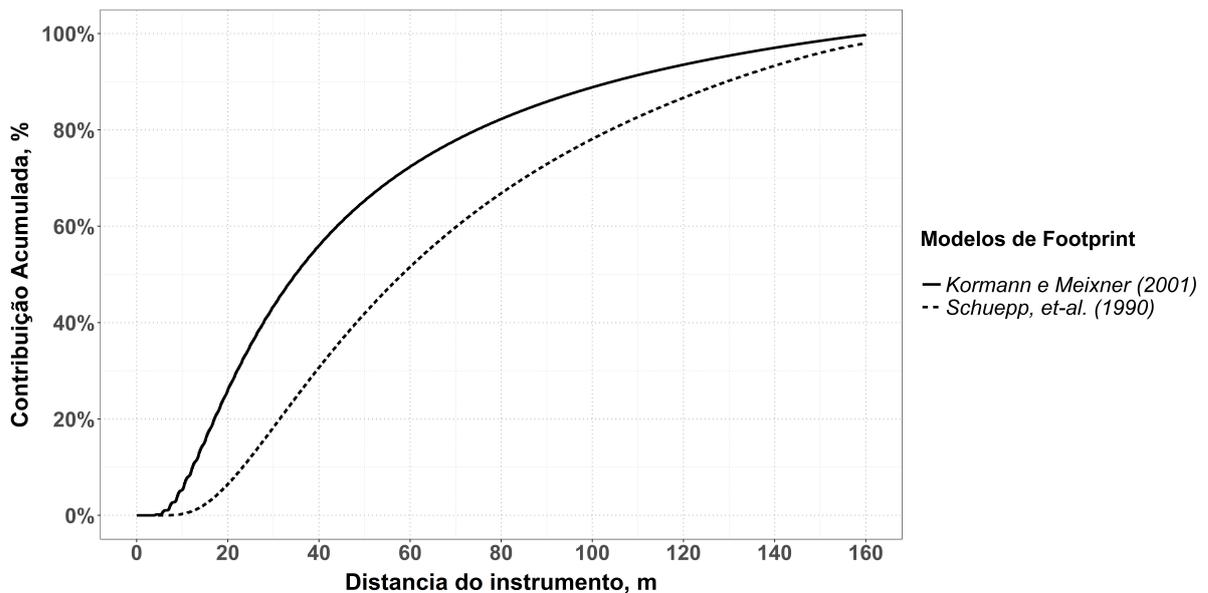
(b) Fluxo de CO<sub>2</sub>.

Figura 4.5 – Distribuição relativa de frequências dos fluxos de: (a) calor sensível, (b) latente e (c) CO<sub>2</sub> de junho de 2011 até abril de 2013. A maior ocorrência de dados é normalizada para a unidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.5a representa a contribuição relativa da superfície ao fluxo registrado pelos sensores em condições de estabilidade neutras para os dois modelos de *footprint* avaliados. Para o modelo de Kormann e Meixner (2001) (linha contínua) se observa que o pico de contribuição, ou seja, a distância na qual os sensores registram medições de fluxo com maior frequência, está a 15,30 m, enquanto para o modelo de Schuepp et al. (1990) (linha tracejada) está a 31,15 m do sensor. Note-se também que no modelo de Kormann e Meixner (2001) a contribuição máxima

(1,77 %) é maior que a do modelo desenvolvido por Schuepp 0,87 %.

A contribuição acumulada do fluxo se obteve integrando a contribuição relativa a longo da distância a partir de onde as torres estavam instaladas, conforme o gráfico da Figura 4.5b. Sendo que, era necessário distinguir os fluxos provenientes unicamente das parcelas (numeradas como 4 e 5, ver Figura 3.2) com limites bem definidos, a distância máxima entre a torre do PD e o ponto médio do extremo inferior da parcela número 5 era 95 m. Deste modo, a contribuição acumulada calculada nessa distância com o método de Kormann e Meixner (2001) foi 87,42 % enquanto a estimada pelo modelo de (SCHUEPP et al., 1990) foi 75,61 %. Isso implica que o método de Kormann e Meixner (2001) leva em consideração uma maior quantidade de informação registrada pelos sensores em áreas pequenas, o que representa uma perda menor de dados no momento da diferenciação dos campos que se querem analisar. Embora, esta comparação é unicamente uma prova individual e não uma validação dos modelos de *footprint*, seus resultados são plausíveis e sustentam a aplicabilidade de ambos neste estudo.

Resumindo pode-se estabelecer que o modelo de Kormann e Meixner (2001) apresenta certas vantagens sobre o modelo de Schuepp et al. (1990), já que serve como ferramenta de predição do *footprint* para áreas pequenas, como neste caso campos destinados à agricultura. Cabe ressaltar também que apesar de aplicar os dois modelos no sítio experimental, se optou por empregar como ferramenta de estimação da representatividade espacial dos sensores o modelo de Kormann e Meixner (2001), pois é aplicável a distintas condições de estabilidade a diferença do modelo de Schuepp et al. (1990) que é restrito somente para condições quase-neutras. Embora, existem outros modelos de *footprint* mais precisos como os modelos estocásticos (ARRIGA et al., 2017; HEIDBACH; SCHMID; MAUDER, 2017), a aplicação das técnicas aqui analisadas foram plausíveis como primeira estimativa para áreas pequenas com culturas de baixa altura.

### 4.3 ANÁLISE DOS FLUXOS DE ENERGIA E CO<sub>2</sub>

Para a análise dos fluxos foram selecionados os intervalos de 30 min que se registraram nas culturas de PC e PD simultaneamente pelos sistemas EC. Na Figura 4.6 se observa a variação temporal dos fluxos de H, LE e CO<sub>2</sub> em ambas técnicas de plantio registrados pelos sistemas EC simultaneamente. No período denominado *pousio*<sub>1</sub> os sensores do sistema EC para o plantio direto apresentaram problemas técnicos razão pela qual não se tem registros que permitam comparar com os fluxos do plantio convencional neste intervalo de tempo. A etapa de seleção dos registros simultaneamente capturados aumentou a quantidade de dados removidos (ver Figura 4.6a), igualmente ocorreu no processo do cálculo do *footprint*, que pretende avaliar os fluxos oriundos unicamente dos campos mencionados na descrição do sítio experimental, ver Figura 4.6b. No Quadro 4.1 mostra-se a porcentagem de dados removidos do total de registros obtidos (37 730) durante o estudo. Após as etapas de preparação e limpeza dos dados, remoção de *spikes* e fluxos de baixa turbulência e seleção de registros que capturaram os sistemas EC no

sítio experimental, também se apresenta a quantidade de dados removidos depois da avaliação do *footprint*. Estas porcentagens representam a quantidade de dados removidos no sistema de PD e do PC.

Quadro 4.1 – Porcentagem de dados de fluxo removidos pelos diferentes processos de filtragem e limpeza no período 14 de junho de 2011 até o 6 de abril de 2013.

<b>Fluxo</b>	<b>Sem <i>footprint</i></b>	<b>Com <i>footprint</i></b>
Calor sensível (H)	42 %	90 %
Calor latente (LE)	48 %	91 %
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	60 %	92 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

A técnica de EC fornece dados em alta resolução temporal, continuamente. Apesar dos desenvolvimentos recentes na técnica EC e da disponibilidade de instrumentos com baixo consumo de energia, as falhas do sistema são inevitáveis e criam lacunas nas medições. Problemas de comunicação na aquisição de dados por quedas de energia, especialmente quando o sistema de energia é baseado em painéis solares; danos a instrumentos, por exemplo, devido a animais ou relâmpagos; calibrações incorretas do sistema; manutenção; e também ações humanas como vandalismo ou roubo. Além desses eventos relacionados à fase de aquisição de dados, também há lacunas introduzidas pela filtragem de qualidade de dados, onde as medidas são descartadas se adquiridas em condições não ideais (AUBINET; VESALA; PAPALE, 2012). Segundo Papale et al. (2006), a aplicação desses filtros nos dados e a filtragem noturna feita representa em média uma perda de 20 – 60 % dos dados sem considerar a análise do *footprint*, o que permite ver que os valores reportados aqui (Quadro 4.1) são satisfatórios.

Neste trabalho, não é feito o preenchimento das lacunas de dados produzidas pelos eventos mencionados anteriormente. Já que nesta pesquisa pretende-se compreender as relações funcionais entre os fluxos de calor e CO<sub>2</sub> para cada cultura com os dois práticas de manejo do solo, com e sem a avaliação do *footprint*. Aqui são calculados valores integrados dos fluxos, apenas com os dados existentes. No entanto, é preciso esclarecer que estas não representam as quantidades absorvidas ou emitidas de CO<sub>2</sub> por cada cultura, igualmente ocorre com os fluxos de calor (ver Quadro 4.2). Esses valores são empregados com o objetivo de avaliar e comparar os impactos gerais das práticas de plantio na dinâmica do carbono e dos fluxos de calor em dois sistemas de cultivo como o mesmo tipo do solo na região sul do Brasil.

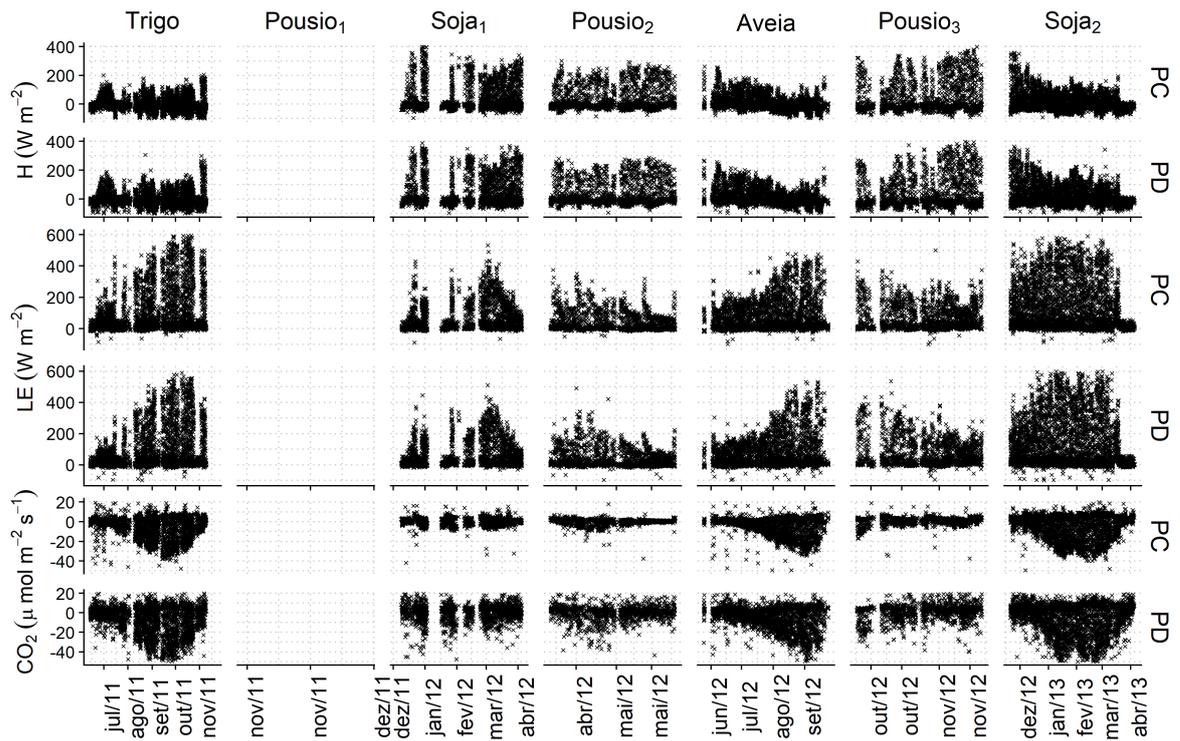
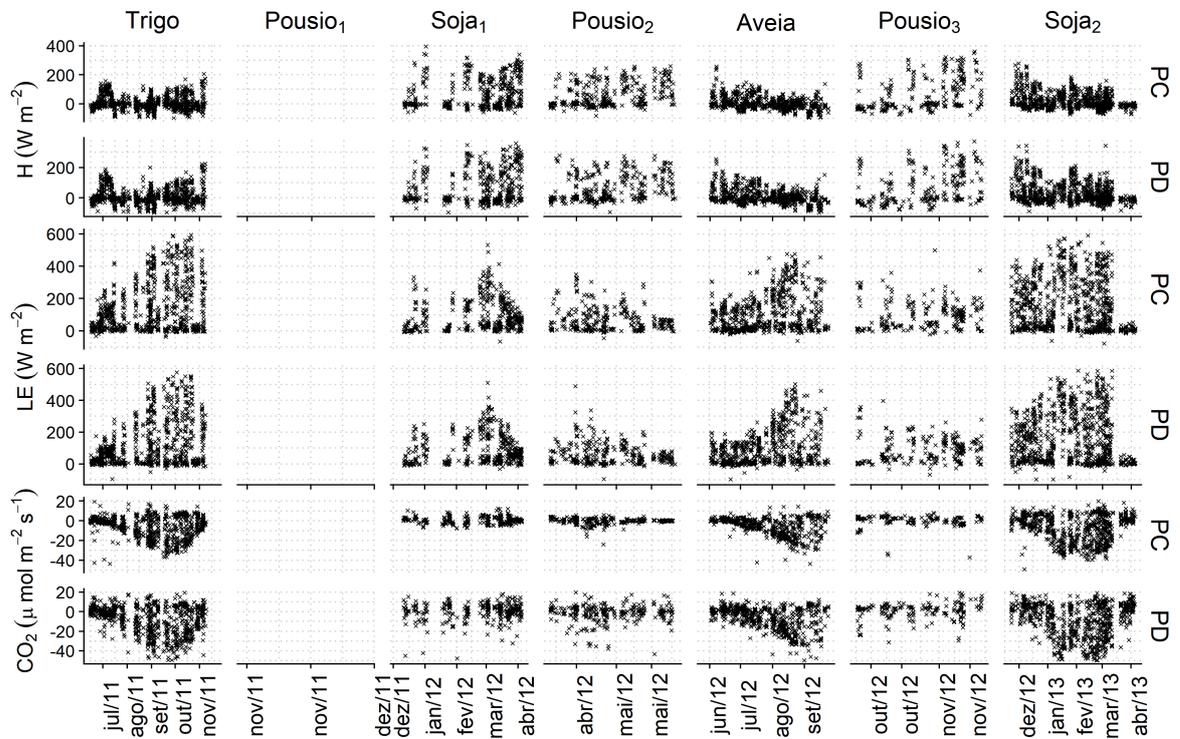
(a) Sem análise do *footprint*(b) Com análise do *footprint*

Figura 4.6 – Variação temporal dos fluxos de H, LE e CO<sub>2</sub> que foram coletados simultaneamente nos sistemas de PD e PC no período 14 de junho de 2011 até o 6 de abril de 2013. (a) sem análise do *footprint* e (b) com análise do *footprint*

### 4.3.1 Fluxos de calor e balanço de energia

Um requisito que deve ser cumprido, apesar das analogias ecológicas e climatológicas entre os sítios de estudo, é a conservação da energia nos sistemas, de acordo com a primeira lei da termodinâmica. Assim, o fechamento do balanço energético é um parâmetro útil para verificar a plausibilidade dos conjuntos de dados obtidos nos sítios de PC e PD (FOKEN, 2006).

Segundo Polonio e Soler (2000), as porcentagens de fluxos de calor sensível e latente com relação à energia disponível dependem da umidade do solo e do estágio de desenvolvimento vegetativo da cultura. Quando a vegetação apresenta seu máximo desenvolvimento, tanto no solo seco como no úmido, o fluxo de calor latente é maior que o do calor sensível. À medida que a cultura entra no processo de decaimento, o fluxo de calor sensível torna-se mais alto do que o calor latente, e a diferença é menos significativa no solo úmido e extremamente perceptível no solo seco. Neste trabalho, é caracterizado o balanço energético usando dados das medições micrometeorológicas do fluxo de energia disponível ( $R_n$  e  $G$ ) e do sistema de EC a soma dos fluxos de calor turbulentos ( $H$  e  $LE$ ). Consequentemente, para cada intervalo de meia hora, a soma do fluxo de calor latente ( $LE$ ) e sensível ( $H$ ) estimados serão equivalentes a todos os outros sumidouros e fontes de energia:

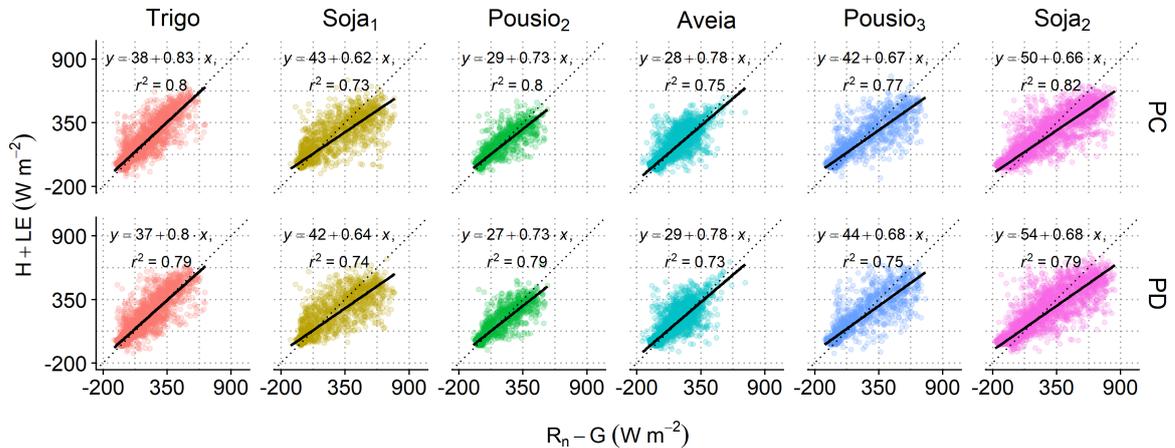
$$H + LE = R_n - G - S - Q$$

onde  $R_n$  é a radiação líquida,  $G$  o fluxo de calor no solo,  $S$  a taxa de troca de armazenamento de calor (ar e biomassa) entre a superfície do solo e o nível dos sensores de EC e  $Q$  a soma de todas as fontes de energia e sumidouros adicionais. Tipicamente  $S$  e  $Q$  são negligenciados por ser termos pequenos dosséis com pouca biomassa.

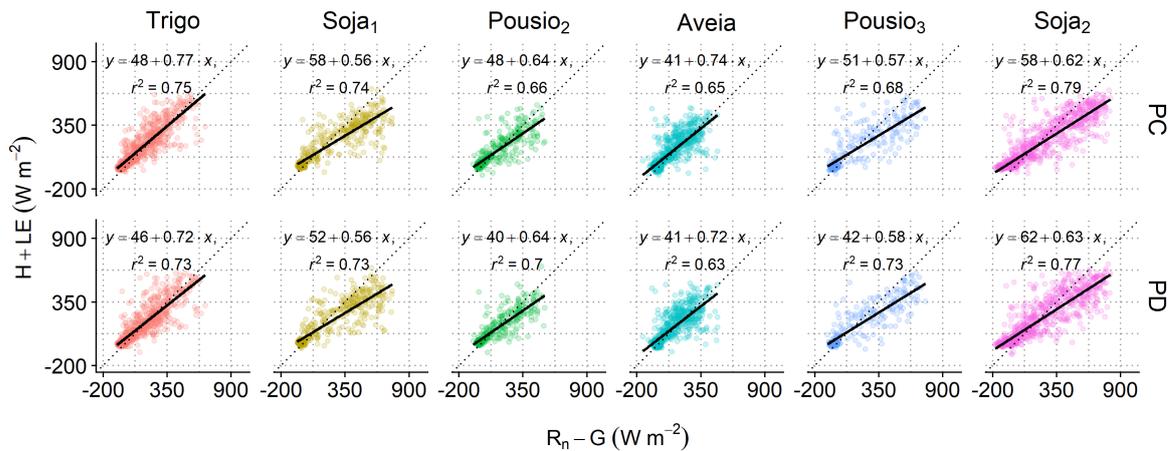
As Figuras 4.7a e 4.7b mostram o balanço de energia de cada cultura e sistema de plantio na área de estudo em Cruz Alta desde o 14 de junho de 2011 até o 6 de abril de 2013 os valores medidos cada meia hora sem e com a análise do *footprint*, respectivamente. A Figura 4.7, também retrata a regressão linear entre a soma dos fluxos de energia turbulentos e os fluxos de energia disponível medidos nos sítios de PC e PD durante todo o período de estudo. A fração de energia disponível capturada pelos fluxos sem o fechamento do *footprint* (Figura 4.7a) variou de 0,62 para a Soja<sub>1</sub>, e 0,83 para o Trigo no sistema de PC, enquanto que para o PD variou de 0,64 para a Soja<sub>1</sub>, e 0,80 para o Trigo. Com o fechamento do *footprint* (Figura 4.7b) os valores foram de 0,56 para a Soja<sub>1</sub>, e 0,77 para o Trigo no sistema de PC, enquanto que para o PD variou de 0,56 para a Soja<sub>1</sub>, e 0,72 para o Trigo e Aveia. Embora, o fechamento de energia não seja perfeito, está na variação típica reportada em estudos como Wilson et al. (2002), Foken et al. (2006), indicando que as medidas estão capturando satisfatoriamente os fluxos de energia e os fluxos de calor.

Para o fechamento do balanço de energia na área de plantio convencional foram usados os dados do sensor instalado na área de plantio direto devido à indisponibilidade de medidas de fluxo de calor no solo. O fechamento poderia ser mais preciso caso houvesse um sensor para

coletar medidas de  $G$  no sistema de PC, já que este pode ser alterado pelo método de preparo do solo. Devemos considerar que o desequilíbrio no fechamento pode ser devido à precisão dos sensores, processamento dos dados ou subestimações das advecções devidas à homogeneidade no terreno (RODDA et al., 2016).



(a) Sem fechamento do *footprint*



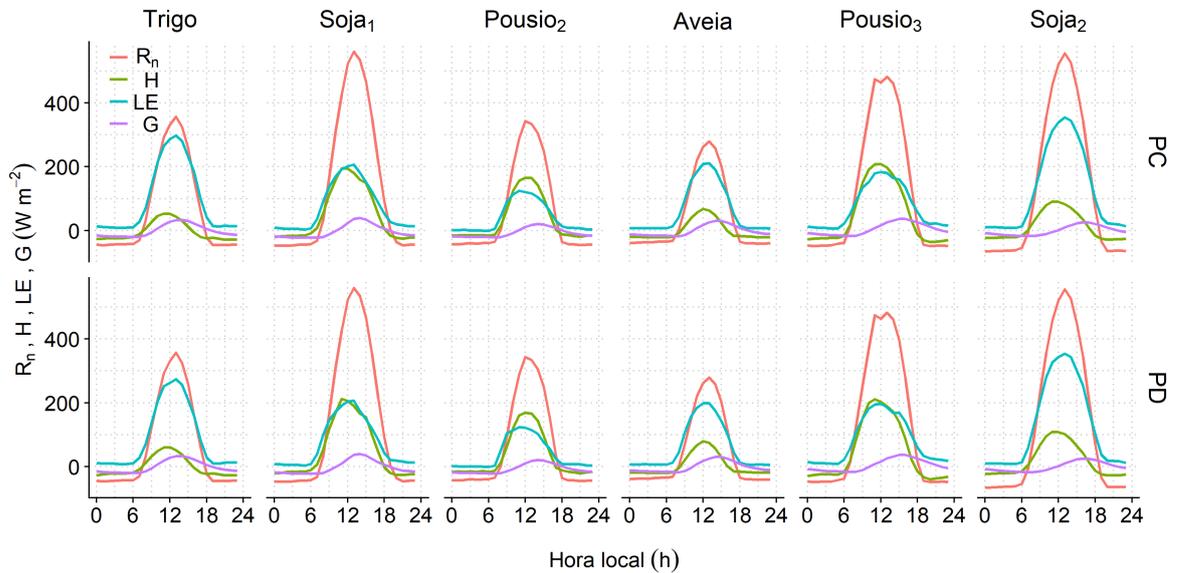
(b) Com fechamento do *footprint*

Figura 4.7 – Fechamento do balanço de energia. As linhas de regressão representam a relação entre os fluxos de energia turbulentos ( $H$  e  $LE$ ) e os fluxos de energia disponível ( $R_n$  e  $G$ ) para o período compreendido entre 14 de junho de 2011 e 6 de abril de 2013.

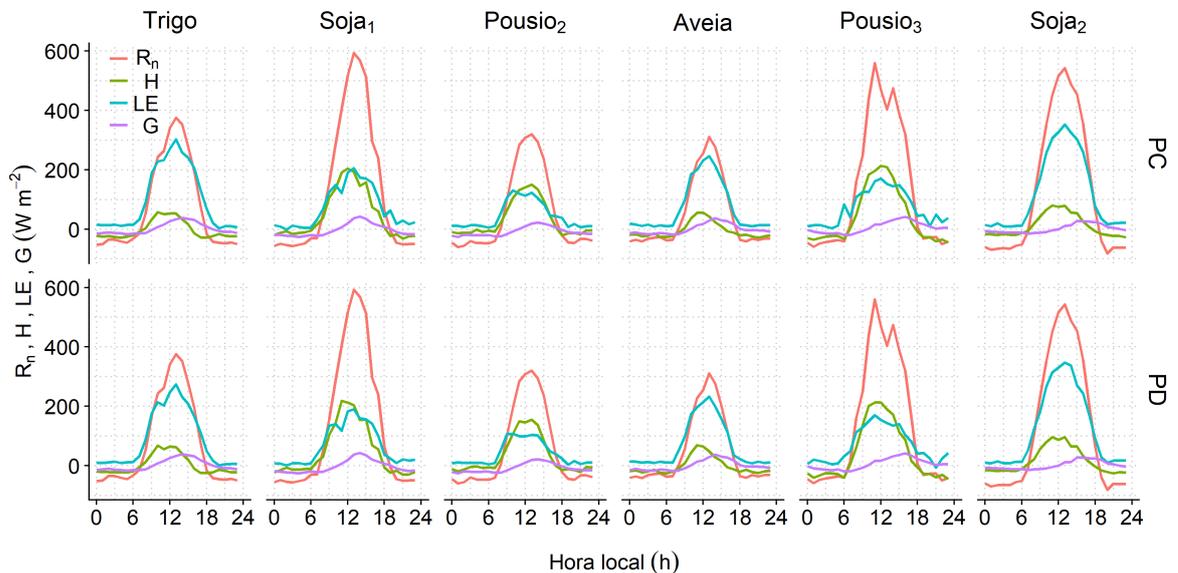
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.8 são mostrados os ciclos diários meios dos fluxos de energia turbulentos ( $H$  e  $LE$ ) e os fluxos de energia disponível ( $R_n$  e  $G$ ) para cada cultura e sistema de plantio com e sem a análise do *footprint*. A partição da energia líquida disponível em fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente foi quase a mesma para cada cultura e tipo de manejo do solo. Durante o período de estudo o particionamento em  $H$  e  $LE$  mostrou uma relação linear (Figura 4.7) e

com  $R_n$  e  $G$ , e picos durante o meio-dia. No caso da soja<sub>1</sub>, o comportamento de  $H$  e  $LE$  não é representativo nem consistente com a soja<sub>2</sub> e  $G$ , pois neste período se apresentaram problemas com os sensores que representou uma perda de 1/3 dos registros (Ver Figura 4.6), além da ocorrência de um período de seca, sendo plantada novamente a cultura.



(a) Sem fechamento do *footprint*



(b) Com fechamento do *footprint*

Figura 4.8 – Ciclos diários meios das componentes do balanço de energia para o período 14 de junho de 2011 até o 6 de abril de 2013.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3.2 Fluxos de CO<sub>2</sub> por cultura

A Figura 4.9 mostra a evolução do fluxo de CO<sub>2</sub> nos dois sistemas de plantio (PD e PC) para todo o período das culturas no experimento de Cruz Alta. A representação é feita com dados a cada 30 min e média diária sem preenchimento de dados. Pode-se observar que no início de cada cultura o fluxo médio apresenta valores mais positivos, isto é, o processo de respiração é maior que o processo da fotossíntese, uma vez que neste período a planta está se desenvolvendo mais lentamente. Logo, o fluxo aumenta rapidamente até haver uma estabilização no crescimento da planta, e o fluxo deixa de aumentar ficando em torno do seu ponto máximo e depois volta a diminuir rapidamente, devido ao processo de senescência da planta, ou seja, as folhas das plantas secam e desta forma a capacidade de realizar fotossíntese diminui (TEICHRIEB, 2012). Pode-se observar também que o fluxo apresenta valores positivos maiores no PC na primeira metade da cultura, e na outra metade o PD apresenta valores positivos maiores. No entanto, no caso da soja<sub>1</sub>, devido aos problemas técnicos anteriormente mencionados não se apreciam os resultados esperados como ocorreu com a soja<sub>2</sub>.

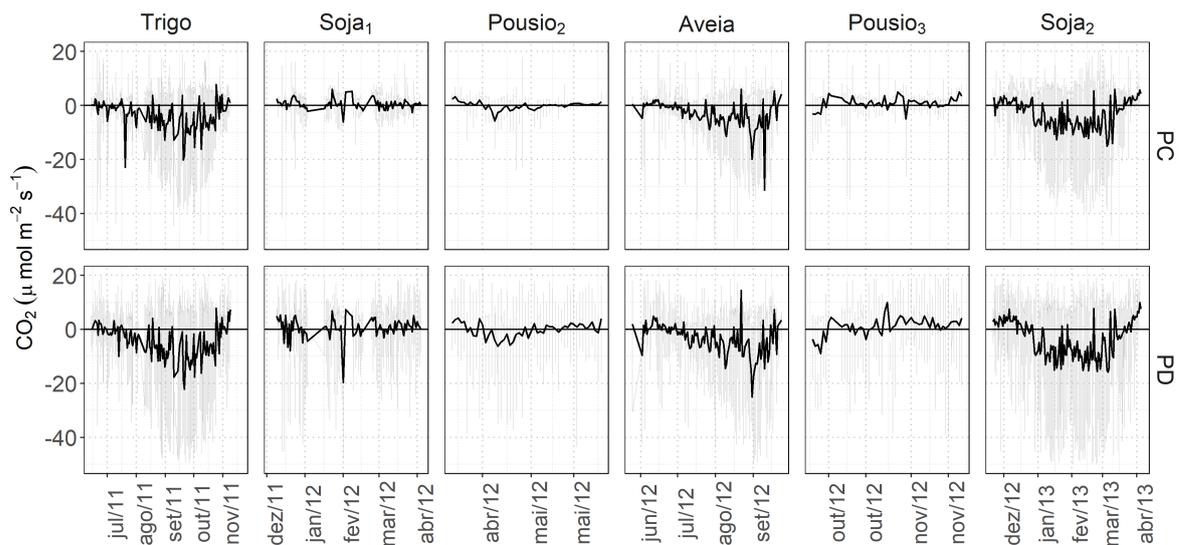
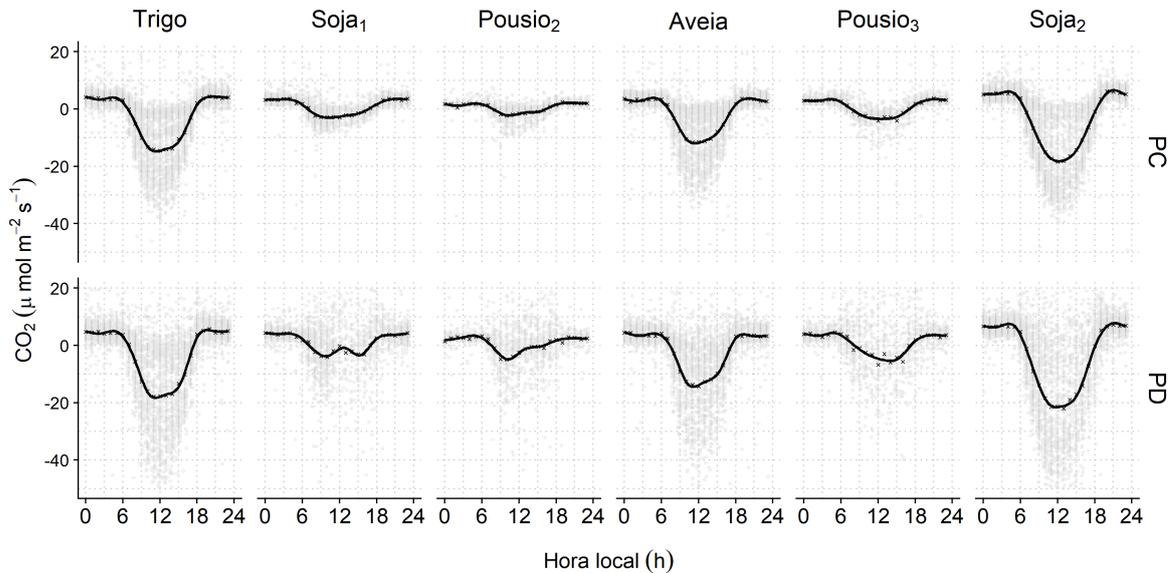


Figura 4.9 – Fluxo de CO<sub>2</sub> com médias de 30 minutos para os dois sistemas de plantio PD e PC de cada cultura, no sítio de Cruz Alta. Os dados são apresentados em séries de 30 min (linhas em cinza) e as suas respectivas médias diárias (linhas em preto).

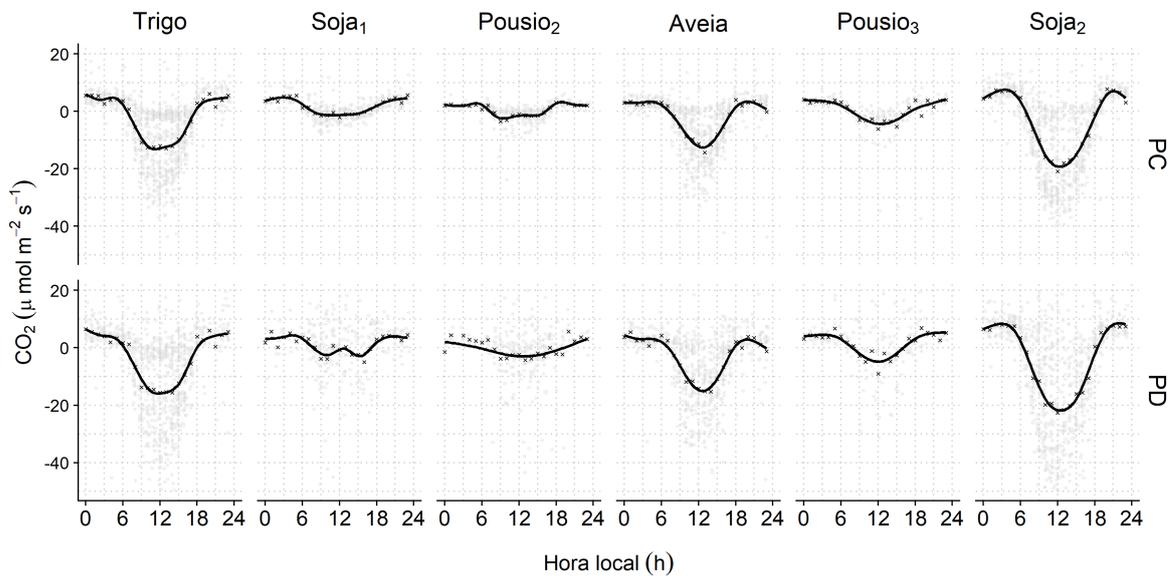
Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações da média diurna do fluxo de dióxido de carbono diferiram para cada cultura e em menor medida para cada tipo do manejo do solo durante o período de captura de dados, ver Figuras 4.10 e 4.11. As variações na respiração de cada cultura durante à noite (fluxo de CO<sub>2</sub> positivo) foram mínimas chegando a valores entre 0 – 10  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . O fluxo de CO<sub>2</sub> devido à fotossínteses durante o dia, perto das 12 horas (fluxo de CO<sub>2</sub> negativo) atingiu picos de até  $-10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para os pousios e diminuiu até  $-40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  no caso do trigo e da soja<sub>2</sub>

no sistema de PD. O comportamento anômalo da soja<sub>1</sub> não é representativo nem consistente, pois neste período se apresentaram problemas com os sensores que representou uma perda de 1/3 dos registros (Ver Figura 4.6). Observa-se que a respiração para os pousios, foi maior no PC que no PD, potencialmente causada pela temperatura maior nos solos mais escuros como resultado do preparo convencional.



(a) Sem fechamento do *footprint*

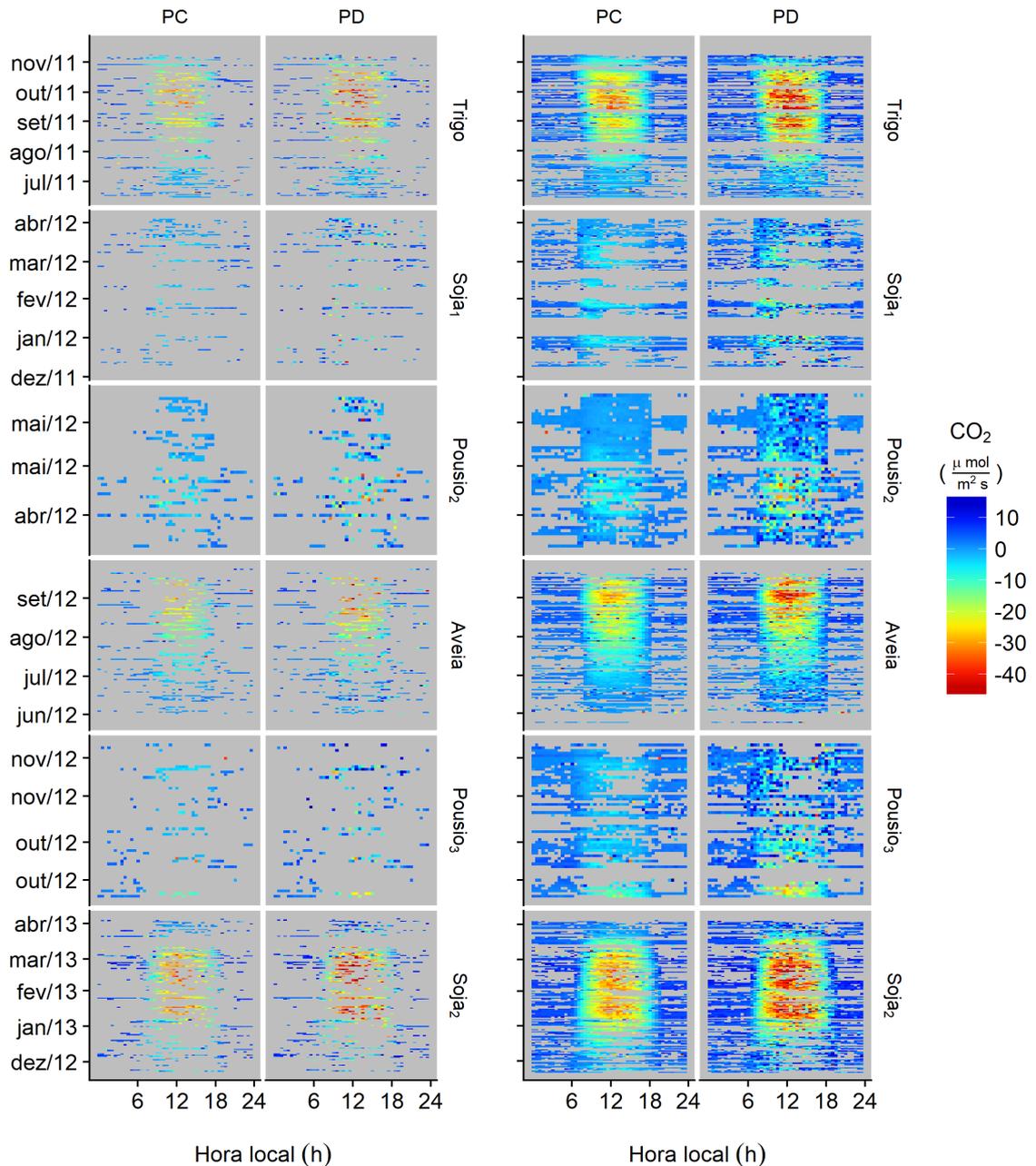


(b) Com fechamento do *footprint*

Figura 4.10 – Variação diurna média por cultura do fluxo de CO<sub>2</sub> durante entre 14 de junho de 2011 e 6 de abril de 2013. Os pontos em cinza representam os dados cada 30 min e a linha preta a média diária do fluxo durante a respectiva cultura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os padrões diários e sazonais do fluxo de CO<sub>2</sub> diferiram nas seis culturas (Fig. 4.11). Primeiramente as culturas apresentaram valores diferentes nas taxas máximas de absorção de carbono dependendo da prática do manejo do solo. A soja<sub>2</sub> apresentou as taxas mais elevadas de captação de carbono (cores vermelhas), principalmente durante a etapa de crescimento de 2013, seguido do trigo, aveia e os pousios, respectivamente. Ver Quadro 4.2.



(a) Gráficos de *fingerprint* do CO<sub>2</sub> para cada cultura e sistema de plantio com fechamento do *footprint*.

(b) Gráficos de *fingerprint* do CO<sub>2</sub> para cada cultura e sistema de plantio sem fechamento do *footprint*.

Figura 4.11 – Gráficos de *fingerprint* do CO<sub>2</sub> para cada cultura e sistema de plantio.

O Quadro 4.2 mostra as estatísticas dos fluxos de H, LE e CO<sub>2</sub> nos sítios de PC e PD, com e sem a análise do *footprint*. As diferenças das médias e somas acumuladas de fluxo de CO<sub>2</sub> de cada cultura para as duas áreas não foram significativas para o trigo, a aveia e a soja<sub>2</sub>, independentemente se foi feito ou não o fechamento do *footprint*.

Quadro 4.2 – Estatísticas do ciclo diurno diário dos fluxos de carbono (CO<sub>2</sub>), calor sensível (H) e latente (LE) para cada cultura nos sítios experimentais de plantio direto (PD) e convencional (PC).

Fluxo	Cultura		Sem <i>Footprint</i> <sup>a</sup>			Com <i>footprint</i> <sup>a</sup>		
			PD	PC	$ \frac{PD}{PC} $	PD	PC	$ \frac{PD}{PC} $
H (W/m <sup>2</sup> )	Trigo		-2,8 ± 46,1	-5,7 ± 42,0	0,49	10,8 ± 54,3	5,8 ± 48,7	1,86
	Soja 1		35,3 ± 93,2	34,2 ± 90,0	1,03	73,7 ± 108,0	72,0 ± 102,0	1,02
	Pousio 2		30,2 ± 78,5	31,6 ± 77,3	0,96	61,2 ± 85,5	61,1 ± 79,8	1,00
	Aveia		4,2 ± 48,2	0,3 ± 44,6	14,00	8,1 ± 47,5	4,0 ± 44,2	2,02
	Pousio 3		45,5 ± 109,7	47,4 ± 107,5	0,96	74,3 ± 117,4	75,0 ± 116,1	0,99
	Soja 2		14,3 ± 64,1	9,0 ± 57,0	1,59	26,6 ± 64,7	19,8 ± 54,9	1,34
LE (W/m <sup>2</sup> )	Trigo		80,2 ± 126,8	87,8 ± 134,2	0,91	124,4 ± 145,8	140,8 ± 154,8	0,88
	Soja 1		60,8 ± 85,7	61,0 ± 86,5	1,00	90,2 ± 92,7	97,2 ± 99,8	0,93
	Pousio 2		39,4 ± 61,5	39,8 ± 60,3	0,99	61,8 ± 67,3	69,6 ± 74,5	0,89
	Aveia		62,8 ± 97,0	65,7 ± 96,5	0,96	99,8 ± 114,7	106,4 ± 114,7	0,89
	Pousio 3		81,8 ± 91,3	75,3 ± 81,5	1,09	89,7 ± 80,1	94,8 ± 85,1	0,95
	Soja 2		118,4 ± 151,9	116,8 ± 146,0	1,01	159,5 ± 158,9	160,5 ± 156,7	0,99
CO <sub>2</sub> (μmol/m <sup>2</sup> s)	Trigo	Média	-4,9 ± 13,6	-4,0 ± 10,5	1,23	-7,8 ± 14,2	-6,0 ± 11,0	1,30
		Soma	-18 243,15 ± 7045,54 <sup>†</sup>	-15 052,41 ± 5514,32 <sup>†</sup>	1,21	-6564,26 ± 2453,69 <sup>†</sup>	-5061,41 ± 1850,95 <sup>†</sup>	1,30
	Soja 1	Média	0,8 ± 8,1	0,6 ± 4,0	1,33	0,2 ± 9,0	0,7 ± 3,4	0,29
		Soma	1536,97 ± 339,61*	1084,64 ± 272,16*	1,42	73,67 ± 67,51*	239,35 ± 72,06*	0,31
	Pousio 2	Média	-0,2 ± 7,7	0,0 ± 3,1	-	-1,7 ± 9,1	-0,4 ± 3,2	4,25
		Soma	-228,17 ± 434,35*	25,50 ± 163,63*	-8,95	-469,93 ± 188,65 <sup>†</sup>	-109,08 ± 72,57 <sup>†</sup>	4,31
	Aveia	Média	-3,9 ± 11,7	-3,4 ± 9,0	1,15	-6,2 ± 11,6	-4,8 ± 9,0	1,29
		Soma	-12 106,91 ± 4047,06 <sup>†</sup>	-10 462,07 ± 3570,81 <sup>†</sup>	1,16	-3941,68 ± 1423,88 <sup>†</sup>	-3038,11 ± 1117,04 <sup>†</sup>	1,30
	Pousio 3	Média	0,8 ± 8,2	0,7 ± 4,0	1,14	0,6 ± 8,9	-0,2 ± 6,0	-3,00
		Soma	1129,78 ± 610,71*	986,45 ± 362,50*	1,15	103,00 ± 42,01*	-36,17 ± 28,92*	-2,85
	Soja 2	Média	-4,3 ± 15,4	-3,7 ± 11,7	1,16	-8,7 ± 17,2	-7,3 ± 13,6	1,19
		Soma	-16 371,13 ± 7336,35 <sup>†</sup>	-13 869,24 ± 5847,81 <sup>†</sup>	1,18	-6809,39 ± 2843,56 <sup>†</sup>	-5604,40 ± 2238,67 <sup>†</sup>	1,22

<sup>a</sup> As unidades do fluxo do CO<sub>2</sub> para a média e a soma são μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e μmol m<sup>-2</sup>, respetivamente. Os valores representam a média mais ou menos a desvio padrão por cultura.

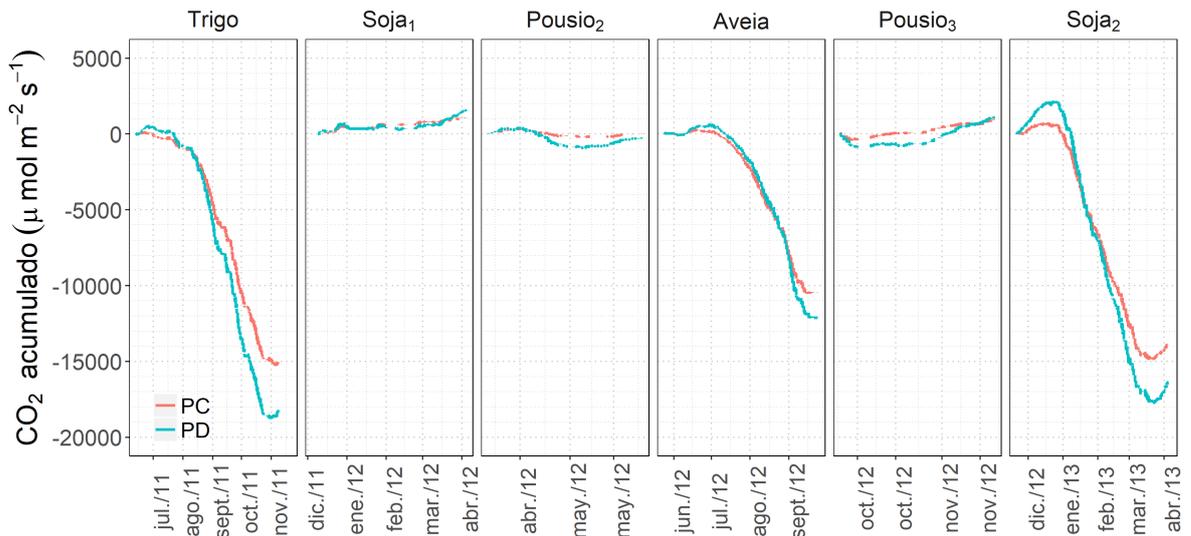
\* Diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

<sup>†</sup> Diferença insignificante ( $p > 0,05$ ).

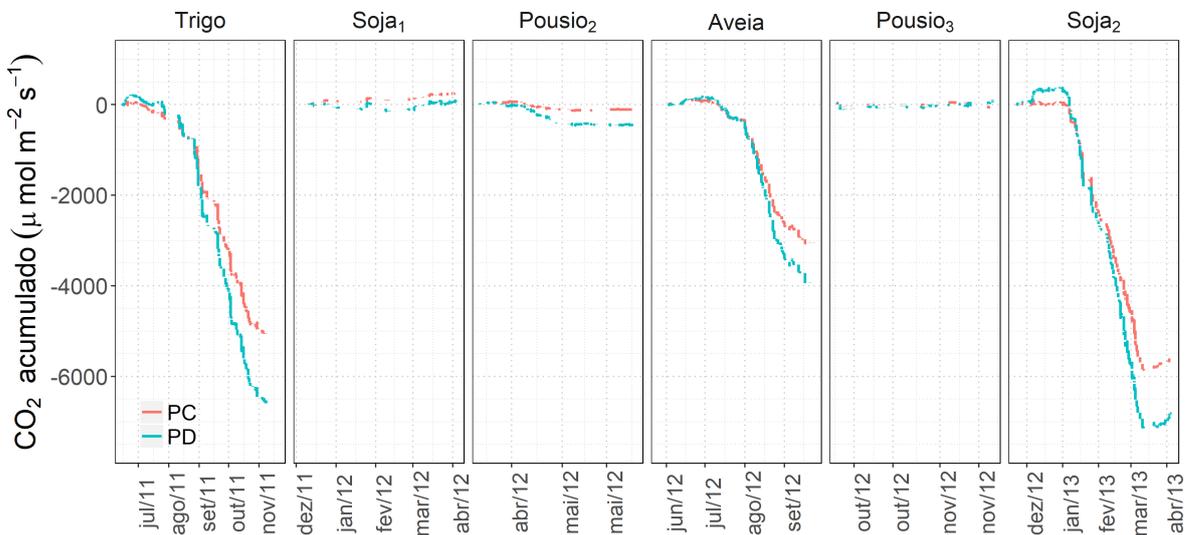
Fonte: Elaborado pelo autor.

As diferenças nos balanços do carbono entre PD e PC podem ser claramente vistas no do fluxo de CO<sub>2</sub> acumulado sazonal para cada cultura (Fig. 4.12). Observa-se também que o fluxo de CO<sub>2</sub> acumulado é maior para o PD, resultando em uma maior produção primária bruta no sistema de plantio direto quando comparado ao sistema de plantio convencional. No

entanto, não se pode quantificar exatamente o valor absorvido ou emitido de cada cultura, pois não foi feito o processo de preenchimento de dados, também chamado *gap-filling*, já que essa investigação detalhada ultrapassaria o alcance deste trabalho. Entretanto, calculou-se a razão de absorção ou emissão do plantio direto em relação ao plantio convencional  $\left| \frac{PD}{PC} \right|$  para cada par de culturas com e sem o fechamento do *footprint*.



(a) Sem fechamento do *footprint*



(b) Com fechamento do *footprint*

Figura 4.12 – Fluxo de CO<sub>2</sub> acumulado durante entre 14 de junho de 2011 e 6 de setembro de 2012.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que em geral a porcentagem de carbono acumulado no PD é

maior comparado com o PC em todas as culturas, o que significa que o sistema de PD absorve mais CO<sub>2</sub> do que o PC, isto se deve principalmente a forma como cada sistema é manejado antes de realizar o plantio, uma vez que no PC o solo é revolvido, e a matéria orgânica que estava sobre o solo é incorporado a ele. Assim a cobertura do solo será menor e desta forma a radiação solar incide diretamente sobre o solo e conseqüentemente a temperatura do solo será maior e a sua umidade será menor, bem como haverá maior contato do resíduo com o solo. Portanto, ocorre maior liberação de carbono orgânico devido a maior atividade microbiana (CHI et al., 2016), com maior liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

No PD os resíduos da cultura ficam sobre o solo, aumentando sua cobertura e ocasionando uma menor temperatura, uma vez que o solo está protegido pelos resíduos. Além disso, o solo retém uma quantidade maior de umidade, apresentando também uma menor liberação de carbono orgânico, devido a pouca atividade microbiana (MOREIRA, 2013), e portanto a liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera será menor.

Descrever as características do fluxo para os pousios é difícil devido a sua curta duração e ainda mais quando se faz o fechamento do *footprint*, porque não existe diferença significativa ( $p > 0,05$ ) nas médias e somas acumuladas em cada sítio. Por outro lado, os registros da soja<sub>1</sub> não permitem caracterizar o seu comportamento durante o estudo, ver Figura 4.1 1b. No Quadro 4.2, se apresenta a razão  $\frac{PD}{PC}$  com a qual se pode inferir a porcentagem no que o plantio direto excede na absorção ao plantio convencional. Em geral, a porcentagem de carbono acumulado no PD é maior comparado com o PC em todas as culturas. No caso do trigo do PD, este absorve entre 21 – 23 % mais do CO<sub>2</sub> no sítio com PC sem o fechamento do *footprint*, enquanto que a aveia e a soja<sub>2</sub> foram de 15 – 16 % e 29 – 30 %, respectivamente. Particularmente a estimativa da quantidade absorvida por cada cultura com o fechamento do *footprint* superestima as quantidades aumentando até 30 % para o trigo, 29 – 30 % para aveia e 19 – 22 % para a Soja<sub>2</sub>. Os resultados deste trabalho coincidem com outros estudos de longo prazo da acumulação de carbono no solo como Amado et al. (2006), Boddey et al. (2010).

## 5 CONCLUSÕES

A técnica de EC é de grande importância para obter medidas de fluxos verticais, que pode ser aplicada ao monitoramento das emissões de gases do efeito estufa. Neste trabalho, se realizaram medições contínuas de fluxos de carbono e calor latente e sensível foram coletadas em dois locais experimentais próximos, porém com distintas práticas de manejo do solo. Os balanços de carbono e energia para cada cultura (trigo, soja, aveia, soja) em sistemas de plantio direto e convencional foram analisados e comparados no período (junho de 2011 a abril de 2013) com dados de fluxo de H, LE e CO<sub>2</sub> sem preenchimento das lacunas e fazendo a análise da extensão espacial dos sensores ou *footprint*.

O balanço de energia mostrou que nos períodos da soja houve maior incidência de radiação solar (verão) e, conseqüentemente, maior energia disponível líquida do que o trigo e a aveia (culturas de inverno). Observou-se que a partição da radiação líquida em fluxo de calor latente foi maior do que o sensível devido à disponibilidade de água resultante da irrigação em cada cultura. A climatologia do *footprint* é uma ferramenta valiosa na comparação de diferentes técnicas de medição de fluxo. Apesar das simplificações inerentes aos modelos analíticos, a aplicação destes para medições de fluxo sobre dosséis curtos (campos destinados à agricultura) indicaram uma alta plausibilidade dos *footprint* calculados.

O presente estudo relata uma estimativa confiável da diferença entre a quantidade de carbono absorvida por duas práticas de manejo do solo, baseada puramente em fluxos de CO<sub>2</sub> calculados a cada 30 minutos dentro da área de um sistema de EC e a demarcação da área de cada cultura com a suposição de vegetação homogênea uniforme, dadas as dificuldades de estudar a interação superfície-atmosfera em experimentos agrícolas. A análise dos fluxos de CO<sub>2</sub> mostra a porcentagem no que o plantio direto excede na absorção ao plantio convencional. Em geral, a porcentagem de carbono acumulado no PD é maior comparado com o PC em todas as culturas. No caso do trigo do PD, este absorve entre 21 – 23 % mais do CO<sub>2</sub> no sítio com PC sem o fechamento do *footprint*, enquanto a aveia e a soja<sub>2</sub> foram de 15 – 16 % e 29 – 30 %, respectivamente. Particularmente observou-se também que a relação da quantidade absorvida por cada cultura entre as práticas de manejo do solo ( $|PD/PC|$ ) levando em consideração a representatividade espacial dos sensores, superestima os fluxos acumulados para cada cultura aumentando até 30 % para o trigo, 29 – 30 % para aveia e 19 – 22 % para a Soja<sub>2</sub>.

Esta análise indica que uma camada de resíduo e uma estrutura de solo intacta (PD) resultam em emissões reduzidas de CO<sub>2</sub> dos ecossistemas agrícolas. Os benefícios de plantio direto, em mitigação de gases do efeito estufa e armazenamento de carbono a longo prazo, precisam ser confirmados com vários anos de medidas e com mais rotações de culturas. Além disso, são necessários mais estudos para fornecer informações adicionais sobre os possíveis benefícios das práticas de plantio direto como uma potencial estratégia de mitigação de gases de efeito estufa na região sul do Brasil. Monitorar essas áreas de cultivo continuamente e outros

sítios com essas práticas de manejo do solo fornecerão informações adicionais. Finalmente, as comparações entre os diferentes sistemas de cultivo (por exemplo, mais detalhes nos pousios e irrigação) são necessárias para determinar as melhores práticas de manejo para agricultura sustentável na região sul do Brasil.

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram que trigo, aveia e soja<sup>2</sup> se comportam como sumidouros de carbono durante seu estabelecimento. Seria interessante para pesquisas futuras avaliar a dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub> para compreender melhor seus efeitos dentro desses ecossistemas. De igual modo, seria útil encontrar as relações entre o PC e PD com os dados preenchidos, para ver se a estimativa converge com as expostas neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADO, T. J. C. et al. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern brazil. **Journal of Environmental Quality**, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society, v. 35, n. 4, p. 1599–1607, 2006.
- ANDERSON, J. P. Soil respiration. **Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties**, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, n. methodsofsoilan2, p. 831–871, 1982.
- ARRIGA, N. et al. Experimental validation of footprint models for eddy covariance co2 flux measurements above grassland by means of natural and artificial tracers. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 242, p. 75–84, 2017.
- ASSIS, S. V. de; FERREIRA, A. T.; SILVA, M. V. da. Situação desconfortante provocada pela ocorrência de veranico. **REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 18, 2007.
- AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The euroflux methodology-ii. theory. **Advances in Ecological Research**, London; New York: Academic Press, c1962-, v. 30, p. 116–118, 2000.
- AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. **Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- AUVINEN, M. et al. Numerical framework for the computation of urban flux footprints employing large-eddy simulation and lagrangian stochastic modeling. **Geoscientific Model Development**, Copernicus GmbH, v. 10, n. 11, p. 4187, 2017.
- BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global change biology**, Wiley Online Library, v. 9, n. 4, p. 479–492, 2003.
- BAYER, C. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and soil**, Springer, v. 238, n. 1, p. 133–140, 2002.
- BAYER, C.; MILENICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, p. 9–39, 1999. ISSN 85-87578-01-4.
- BODDEY, R. M. et al. Carbon accumulation at depth in ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Wiley Online Library, v. 16, n. 2, p. 784–795, 2010.
- BOLLIGER, A. et al. Taking stock of the brazilian “zero-till revolution”: A review of landmark research and farmers’ practice. **Advances in agronomy**, Elsevier, v. 91, p. 47–110, 2006.
- BONDEAU, A. et al. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. **Global Change Biology**, Wiley Online Library, v. 13, n. 3, p. 679–706, 2007.
- 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.

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**, Elsevier, v. 218, p. 37–49, 2016.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, 2013.

FILHO, A. G. et al. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 30, n. 6, 2000.

FOKEN, T. 50 years of the monin–obukhov similarity theory. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 119, n. 3, p. 431–447, 2006.

FOKEN, T.; LECLERC, M. Y. Methods and limitations in validation of footprint models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 127, n. 3–4, p. 223–234, 2004. ISSN 01681923.

FOKEN, T. et al. Some aspects of the energy balance closure problem. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 6, n. 12, p. 4395–4402, 2006.

FRANCHINI, J. C. et al. Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no paran . **Londrina: Embrapa Soja**, 2011.

FRANZLUEBBERS, A.; HONS, F.; ZUBERER, D. Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. **Soil Science Society of America Journal**, Soil Science Society of America, v. 58, n. 6, p. 1639–1645, 1994.

GARRATT, J. R. **The atmospheric boundary layer / J. R. Garratt**. [S.l.]: Cambridge University Press Cambridge ; New York, 1992. xviii, 316 p. : p. ISBN 0521380529.

Global CCS Institute. **Atmospheric monitoring methods**. 2017. <<https://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/103066/advanced/fig-032.jpg>>. [Acesso em 12 agosto de 2017].

GOODE, E. Farmers put down the plow for more productive soil. **The New York Times**, v. 9, 2015.

HEIDBACH, K.; SCHMID, H. P.; MAUDER, M. Experimental evaluation of flux footprint models. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 246, p. 142–153, 2017.

HÖGSTRÖM, U. Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. In: **Topics in Micrometeorology. A Festschrift for Arch Dyer**. [S.l.]: Springer, 1988. p. 55–78.

HORST, T.; WEIL, J. How far is far enough?: The fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 11, n. 4, p. 1018–1025, 1994.

HSU, S.; MEINDL, E. A.; GILHOUSEN, D. B. Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability conditions at sea. **Journal of Applied Meteorology**, v. 33, n. 6, p. 757–765, 1994.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorología: Estação Automática Cruz Alta**. 2017. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. [Acesso em 12 agosto de 2017].

JIMÉNEZ, F.; LHOMME, J. P. **Elementos de Micrometeorologia**. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE, 1990. 55 p. ISBN 9789580226260.

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

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. Implantação e manejo do sistema plantio direto. **Embrapa Trigo-Documentos (INFOTECA-E)**, Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000., 2000.

KORMANN, R.; MEIXNER, F. X. An analytical footprint model for non-neutral stratification. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 99, n. 2, p. 207–224, 2001. ISSN 00068314.

KUZYAKOV, Y. Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil Biology and Biochemistry**, Elsevier, v. 38, n. 3, p. 425–448, 2006.

LI, X. et al. Comparison of sensible heat fluxes measured by a large aperture scintillometer and eddy covariance system over a heterogeneous farmland in east china. **Atmosphere**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 6, p. 101, 2017.

MAHRT, L. Stratified atmospheric boundary layers and breakdown of models. **Theoretical and computational fluid dynamics**, Springer, v. 11, n. 3-4, p. 263–279, 1998.

MASSMAN, W.; LEE, X.; LAW, B. Handbook of micrometeorology. a guide for surface flux measurements and analysis. **Atmospheric and Oceanographic Sciences Library**. 29., 2004.

MCMILLEN, R. T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 43, n. 3, p. 231–245, 1988.

METZGER, M.; MCKEON, B.; HOLMES, H. The near-neutral atmospheric surface layer: turbulence and non-stationarity. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society, v. 365, n. 1852, p. 859–876, 2007.

MOREIRA, G. d. A. **Métodos para obtenção da altura da camada limite planetária a partir de dados de Lidar**. 2013. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2013.

MOREIRA, V. S. **Balço de água no ciclo da cultura de soja: representação no modelo de vegetação dinâmica AGRO-IBIS**. 2012. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

NEFTEL, A.; SPIRIG, C.; AMMANN, C. Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations. **Environmental Pollution**, Elsevier, v. 152, n. 3, p. 644–652, 2008.

NUNES, A. B. **Crescimento da Camada Limite Convectiva: Estudo analítico e numérico**. 2008. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.

OBUKHOV, A. Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. **Boundary-layer meteorology**, Springer, v. 2, n. 1, p. 7–29, 1971.

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

OLIVEROS, L. F. C. **Emissões de CO<sub>2</sub> do solo sob preparo convencional e plantio direto em latossolo vermelho do Rio Grande do Sul**. 2008. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

OPTIS, M.; MONAHAN, A.; BOSVELD, F. C. Limitations and breakdown of monin–obukhov similarity theory for wind profile extrapolation under stable stratification. **Wind Energy**, Wiley Online Library, v. 19, n. 6, p. 1053–1072, 2016.

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

PASQUILL, F.; SMITH, F. B. **Atmospheric Diffusion: Study of the dispersion of windborne material from industrial and other sources**. [S.l.]: Ellis Horwood Limited; England, 1983. ISBN 0-85312-426-4.

POLONIO, D.; SOLER, M. Surface fluxes estimation over agricultural areas. comparison of methods and the effects of land surface inhomogeneity. **Theoretical and applied climatology**, Springer, v. 67, n. 1-2, p. 65–79, 2000.

PYLE, J.; CURRY, J. A.; HOLTON, J. R. **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. [S.l.]: Credo Reference, 2014.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2017. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

REBIA. **Brasil decidirá sobre proposta de emissões no dia 14**. 2009. <<http://www.portaldomeioambiente.org.br/assuntos-gerais/2306-brasil-decidira-sobre-proposta-de-emissoes-no-dia-14.html>>. [Acesso em 12 mayo de 2018].

RODDA, S. R. et al. Seasonal variations of carbon dioxide, water vapor and energy fluxes in tropical indian mangroves. **Forests**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 2, p. 35, 2016.

ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste., 2006.

SCHIMMEL, D. et al. Contribution of increasing co2 and climate to carbon storage by ecosystems in the united states. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 287, n. 5460, p. 2004–2006, 2000.

SCHMID, H. P. Footprint modelling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. p. 159–183, 2002.

SCHUEPP, P. et al. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 50, n. 1, p. 355–373, 1990.

SCOPEL, E. et al. Quantifying and modeling the effects of a light crop residue mulch on the water balance: an application to rainfed maize in western mexico. CIRAD-CA, 1998.

SIQUEIRA, J. et al. Transformações bioquímicas e ciclos dos elementos no solo. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora da Ufla, p. 305–329, 2002.

SMEDMAN, A.-S. et al. Heat/mass transfer in the slightly unstable atmospheric surface layer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 133, n. 622, p. 37–51, 2007.

SMITH, P. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, The Royal Society, v. 363, n. 1492, p. 789–813, 2008.

SNYDER, C. et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Elsevier, v. 133, n. 3, p. 247–266, 2009.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 1988. 670 p. ISBN 9789027727695.

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

VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de c-co<sub>2</sub> e n mineral de um podzólico vermelho-escuro submetido a diferentes sistemas de manejo: Microbial biomass and c-co<sub>2</sub> and mineral nitrogen production in paleudult soil cultivated under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, SciELO Brasil, v. 24, n. 1, p. 35–42, 2000.

VESALA, T. et al. Eddy covariance measurements of carbon exchange and latent and sensible heat fluxes over a boreal lake for a full open-water period. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 111, n. D11, 2006.

\_\_\_\_\_. Flux and concentration footprint modelling: State of the art. **Environmental Pollution**, Elsevier, v. 152, n. 3, p. 653–666, 2008.

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**, Elsevier, v. 218, p. 25–36, 2016.

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

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

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. **Soil Science Society of America Journal**, Soil Science Society, v. 66, n. 6, p. 1930–1946, 2002.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2009. ISBN 978-0-387-98140-6. Disponível em: <<http://ggplot2.org>>.

WILSON, K. et al. Energy balance closure at fluxnet sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 113, n. 1, p. 223–243, 2002.

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

ZERI, M. et al. Carbon exchange by establishing biofuel crops in central illinois. **Agriculture, ecosystems & environment**, Elsevier, v. 144, n. 1, p. 319–329, 2011.