

VANDA MARIA SALES DE ANDRADE

**RELAÇÕES DE DEPENDÊNCIA ENTRE FLUXOS DE CO₂ E VARIÁVEIS
METEOROLÓGICAS NA CULTURA DE MILHO (*Zea mays* L.)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A553r
2009

Andrade, Vanda Maria Sales de, 1973-
Relações de dependência entre fluxos de CO₂ e variáveis
meteorológicas na cultura de milho (*Zea mays* L.) / Vanda
Maria Sales de Andrade. – Viçosa, MG, 2009.
xxi, 78f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: José Maria Nogueira da Costa.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 72-78.

1. Micrometeorologia. 2. Dióxido de carbono - Medição.
3. Milho - Fatores climáticos. I. Universidade Federal de
Viçosa. II. Título.

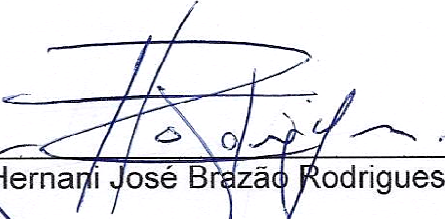
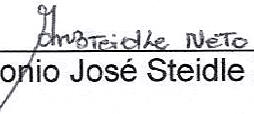
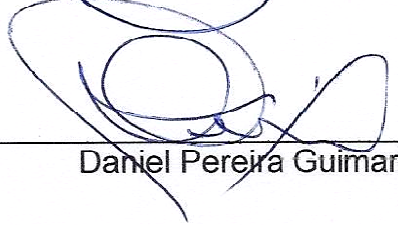
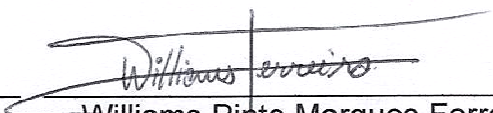
CDD 22.ed. 551.66

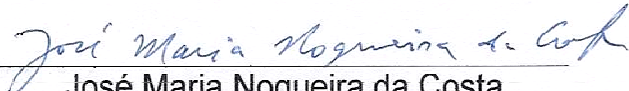
VANDA MARIA SALES DE ANDRADE

**RELAÇÕES DE DEPENDÊNCIA ENTRE FLUXOS DE CO₂ E VARIÁVEIS
METEOROLÓGICAS NA CULTURA DE MILHO (*Zea mays* L.)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 31 de julho de 2009.

 _____ Hernani José Brazão Rodrigues	 _____ Antonio José Steidle Neto
 _____ Daniel Pereira Guimarães	 _____ Williams Pinto Marques Ferreira (Coorientador)



José Maria Nogueira da Costa
(Orientador)

A Deus, pela luz e força.

Aos meus pais, José Guedes de Andrade e Maria do Carmo Sales de Andrade,
meus exemplos, por me darem a vida, a chance e a oportunidade.

Aos meus irmãos, Maurício, Cristina e Mirian,
por existirem, por serem a minha alegria
e por me apoiarem em todos os momentos dessa jornada.

À minha família, em especial a Daniel, Lene (cunhada), tia Fátima, tio Mingão,
Juliana, Rafa e tio Milson, por acreditaram em mim.

Ao meu marido, Paulo Roberto, pelo amor, pela admiração, pela força.

Em especial, ao meu filho, que é e será a luz da minha vida.

*O homem que é prudente não diz
tudo quanto pensa, mas pensa tudo quanto diz.*
Aristóteles

*Somos aquilo que repetidamente
fazemos. A existência, portanto, não é
um feito, mas um hábito.*
Aristóteles

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao programa PDEE, pelo incentivo e pelo apoio internacional.

À Embrapa Milho e Sorgo, pelo apoio na realização deste estudo na área experimental.

Ao meu orientador, professor José Maria Nogueira da Costa, pelos preciosos ensinamentos, pelo grande apoio e pela confiança.

Ao professor João Santos Pereira, professor em Portugal, pelo apoio e pelo incentivo.

Ao meu coorientador, Williams Pinto Marques Ferreira, por todo apoio nessa grande jornada.

Aos pesquisadores da EMBRAPA, Luís Marcelo Aguiar Santos e Daniel Pereira Guimarães, pelo apoio durante todo o período experimental.

Ao senhores Laudário e Reginaldo, do SNT da Embrapa Milho e Sorgo.

Aos amigos de Portugal, Raquel, Lena, Alexandra, João Banza, Felipe, Marta, João Mateus, pelo apoio, pelo incentivo e pelo carinho.

À grande amiga Jordânia, pelo grande apoio, pela força nos momentos de fraqueza, pelo incentivo e pela confiança nos momentos de alegria e tristeza.

Ao grande amigo Marcos e a toda a sua família (Isabelia, ValcÍrio e Raabe), pelo apoio incondicional nesta empreitada, pelo carinho e pela dedicaçŁo.

À amiga Betinha, pelo carinho e pelo apoio nos momentos difíceis.

A toda família Rodrigues, pelo apoio dado.

A todos os professores do Programa de Meteorologia AgrÍcola, SÉrgio Zolnier, Luiz ClÁudio Costa, Marcos Heil Costa, Gilberto C. SediYama, FlÁvio Barbosa Justino e Paulo JosÉ Hamakawa.

A todos os colegas de pós-graduaçŁo que contribuÍram ao longo deste doutorado, para realizaçŁo deste estudo, Leonardo Aguiar, Evandro Chaves, SÉrgio Mattos e Leonardo Neves.

A todas as pessoas da Embrapa Milho e Sorgo que, direta ou indiretamente, contribuÍram para realizaçŁo deste estudo.

BIOGRAFIA

VANDA MARIA SALES DE ANDRADE, filha de José Guedes de Andrade e Maria do Carmo Sales de Andrade, nasceu em 28 de agosto de 1973, em Belém, PA.

Em outubro de 1999, graduou-se em Meteorologia, pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém, PA.

Em julho de 2000, concluiu o Curso de Especialização em Sensoriamento Remoto, pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém, PA.

De fevereiro de 2000 a fevereiro 2003, atuou como bolsista do Projeto LBA – Experimento de Grande Escala da Biosfera – Atmosfera na Amazônia, realizando atividades de pesquisa de campo.

Em março de 2003, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas, submetendo-se à defesa de tese em 23 de fevereiro de 2005.

Em março de 2005, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas, submetendo-se à defesa de tese em 31 de julho de 2009.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xvii
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Milho BR 106	4
2.2. Estádio fenológico do milho	5
2.3. Instrumentos de mensuração das variáveis ambientais radiação solar global ($W.m^{-2}$)	7
2.3.1. Radiação fotossinteticamente ativa – PAR ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$)	7
2.3.2. Saldo de radiação solar ($W.m^{-2}$)	8
2.3.3. Temperatura ($^{\circ}C$) e umidade relativa do ar (%)	8
2.3.4. Temperatura do solo ($^{\circ}C$)	9
2.3.5. Direção e velocidade do vento	10

2.3.6. Precipitação pluvial (mm)	10
2.3.7. <i>Datalogger</i> CR10 X.....	11
2.4. Equipamentos para medições dos fluxos de CO ₂	12
2.4.1. Analisador de gás LI-6262.....	14
2.4.2. Princípio de funcionamento do analisador de gás LI-6262	14
2.5. Processamento de dados	16
2.6. Camada limite atmosférica	18
2.7. Variações nas concentrações de CO ₂ na atmosfera	21
2.8. Estratégias para medições e modelagem dos fluxos de CO ₂ em culturas agrícolas.....	22
2.9. Técnicas micrometeorológicas utilizadas nas medições de fluxos de massa e de energia	23
2.9.1. Método aerodinâmico	24
2.9.2. Método do balanço de energia – razão de Bowen	25
2.9.3. Método de covariância dos vórtices turbulentos.....	25
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1. Descrição da área experimental	28
3.2. O experimento	28
3.3. A obtenção dos dados	30
3.3.1. Instrumentação micrometeorológica.....	30
3.3.2. Medições de fluxos de massa e de energia.....	31
3.3.2.1. Método aerodinâmico ou método do gradiente de fluxo.....	31
3.3.2.2. Método do balanço de energia – razão de Bowen	32
3.3.2.3. Medições dos fluxos de CO ₂ (<i>Eddy Covariance</i>).....	33
3.3.3. Método de covariância dos vórtices turbulentos.....	34
3.3.3.1. Variância	40
3.3.3.2. Covariância e correlação.....	40
3.3.4. Analisador de gás LI-6262.....	41

3.3.5. Processamento dos dados	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Condições microclimáticas durante o ciclo da cultura do milho	43
4.2. Variações horárias, diárias e sazonais da concentração de CO ₂ acima da cultura de milho no longo de seu ciclo.....	53
4.3. Fluxos de CO ₂ durante o período diurno	58
4.4. Fluxos de CO ₂ durante o período noturno	61
4.5. Fluxos noturnos de CO ₂ entre a cultura de milho e a atmosfera.....	61
4.6. Fluxos diurnos de CO ₂ entre a cultura de milho e a atmosfera.....	63
4.7. Relações de dependência entre fluxos de CO ₂ e as variáveis meteorológicas, a radiação fotossinteticamente ativa e a temperatura do solo.....	67
5. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características agronômicas do milho BR 106	5
Tabela 2 - Datas referentes a cada (EF) estágio fenológico e os dias juliano (DJ) do milho BR 106.....	6
Tabela 3 - Variáveis avaliadas no experimento, instrumentação utilizada com as respectivas alturas de instalação	31
Tabela 4 - Variação da concentração de CO ₂ com valores máximo, mínimo e médio; direção predominante; e número de eventos do vento, na área experimental no período diurno.....	56
Tabela 5 - Variação da concentração máxima e mínima de CO ₂ , direção predominante e número de eventos do vento, na área experimental no período noturno.....	57
Tabela 6 - Valores de fluxos de CO ₂ em variados ecossistemas.....	66
Tabela 7 - Relação de dependência entre fluxos de CO ₂ (Fc) e temperatura do ar (Tar), a umidade relativa (UR), o déficit de pressão de vapor e a temperatura do solo (Ts), durante o ciclo da cultura	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos estádios da planta de milho.	6
Figura 2 - Piranômetro modelo SP LITE.	7
Figura 3 - Detector fotovoltaico de silício.	8
Figura 4 - Saldo de radiação Q-7.1.	8
Figura 5 - Higrômetro, abrigo do sensor B (A); e sensor HMP45C (B).	9
Figura 6 - Sensor de temperatura do solo.	9
Figura 7 – Anemômetro.	10
Figura 8 - Pluviógrafo modelo CS 700-L.	11
Figura 9 - Datalogger CR10X Campbell Scientific.	11
Figura 10 - Destaque demonstrativo dos movimentos turbulentos e térmicos, medidos pela técnica de <i>Eddy Covariance</i>	13
Figura 11 - Destaque dos transdutores no interior do anemômetro sônico e esquema de medição do vento entre os tradutores.	13
Figura 12 - Analisador de gás Li-Cor 6262.	15
Figura 13 - Destaque demonstrativo sobre a cultura, nas medições dos fluxos de CO ₂ , utilizando a técnica <i>Eddy Covariance</i> , por meio do sistema edisol. ...	17
Figura 14 - Imagem dos softwares de processamento dos dados (<i>Eddy meas</i> e <i>Eddyflux</i>).	18
Figura 15 - Estrutura vertical da camada limite da atmosfera.	19

Figura 16 - Imagem da localização do pivot 3, na área pertencente à Embrapa Milho e Sorgo (área experimental em destaque), Sete Lagoas, MG.....	29
Figura 17 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos V4 e VT da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.	44
Figura 18 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos V4 e VT da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.	45
Figura 19 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos R3 e R6 da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.	46
Figura 20 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos R3 e R6 da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.	47
Figura 21 - Variação das horas de brilho solar, durante os estádios fenológicos da cultura de milho.....	50
Figura 22 - Distribuição da precipitação (PRP) durante o período experimental.	51
Figura 23 - Número de eventos da direção predominante do vento na área experimental.....	51
Figura 24 - Variação da velocidade de fricção U^* , ao longo do experimento no período diurno, sobre a cultura do milho BR106.	52
Figura 25 - Variação da velocidade de fricção U^* , ao longo do experimento no período noturno, sobre a cultura do milho BR106.....	53
Figura 26 - Variação da concentração de CO_2 , a cada 30 minutos, no longo do experimento conduzido entre outubro de 2008 e março de 2009.	54
Figura 27 - Valores médios diários das concentrações de CO_2 , no período diurno, durante os meses outubro de 2008 a março de 2009.....	54
Figura 28 - Variação média da concentração de CO_2 noturno, durante os meses de outubro de 2008 a março de 2009.....	55
Figura 29 - Variação horária dos valores médios da concentração de CO_2 , durante os meses de outubro de 2008 a março de 2009.....	58
Figura 30 - Variação sazonal dos fluxos de CO_2 , no longo do experimento, de outubro de 2008 a março de 2009.	59
Figura 31 - Variação média diária dos fluxos de CO_2 , no decorrer do experimento de outubro de 2008 a março de 2009.....	60
Figura 32 - Variação média do fluxo de CO_2 , no decorrer do ciclo da cultura, em razão do índice de área foliar.....	60
Figura 33 - Variação horária dos valores médios noturnos dos fluxos de CO_2 . 62	

Figura 34 - Variação horária dos valores médios noturnos dos fluxos de CO ₂ e da velocidade de fricção.	63
Figura 35 - Variação média dos fluxos de CO ₂ no horário diurno, em novembro e dezembro.	64
Figura 36 - Variação média dos fluxos de CO ₂ no horário diurno, em janeiro e fevereiro.	65
Figura 37 - Variação média dos fluxos de CO ₂ no horário diurno e a velocidade de fricção.....	67
Figura 38 - Relação entre fluxos diurnos de CO ₂ (Fc) com o saldo de radiação (Rn) e com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), para os meses de novembro e dezembro de 2008.	68
Figura 39 - Relação entre fluxos diurnos de CO ₂ (Fc) com o saldo de radiação (Rn) e com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), para os meses de janeiro e fevereiro de 2009.	69
Figura 40 - Relação entre fluxos de CO ₂ (Fc) e a duração do brilho solar.	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
CO ₂	Dióxido de carbono	μmol.m ⁻² .s ⁻¹
c _p	Calor específico do ar à pressão constante	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
DPV	Déficit da pressão de vapor	h Pa
e	Pressão que o vapor d'água exerce na atmosfera	h Pa
e _a	Pressão de vapor em um nível de referência	h Pa
e _s	Pressão de saturação do vapor d'água	h Pa
F _c	Fluxo de carbono	μmol.m ⁻² .s ⁻¹
g _a	Condutância aerodinâmica	m.s ⁻¹
H	Fluxo de calor sensível	W.m ⁻²
k	Constante de von Karmann	-
LE	Fluxo de calor latente	W.m ⁻²
L	Calor latente de vaporização da água	J.kg ⁻¹
m _a	Massa de ar	kg
m _v	Massa de vapor d'água	G
n	Número de horas de brilho solar	H

n	Número de dados da amostra	-
DJ	Dia juliano	-
P	Pressão atmosférica	h Pa
R_g	Radiação solar global	$W.m^{-2}$
R_n	Saldo de radiação	$W.m^{-2}$
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa	$\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
T_{ar}	Temperatura do ar	$^{\circ}C$
T_s	Temperatura do solo	$^{\circ}C$
T_{max}	Temperatura máxima	$^{\circ}C$
T_{min}	Temperatura mínima	$^{\circ}C$
T_{vs}	Temperatura virtual sônica	$^{\circ}C$
TBS	Total de brilho solar	-
UR	Umidade relativa do ar	%
VV	Velocidade do vento	$m.s^{-1}$
w	Componente vertical da velocidade do vento	$m.s^{-1}$
w'	Componente vertical das flutuações da vel. do vento	$m.s^{-1}$
β	Razão de Bowen	-
λ	Constante psicrométrica	-
φ	Latitude	Graus
Θ	Temperatura potencial	$^{\circ}C$
ρ_a, ρ	Densidade do ar ou massa específica do ar	$g.kg^{-1}$
ρ_c	Densidade do escalar C	-
k	Coeficiente de difusividade turbulenta	$m.s^{-1}$
Σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$h Pa K^{-1}$

$\frac{\partial \bar{c}}{\partial z}$	Gradiente de concentração do constituinte “c”	-
τ	Fluxo de <i>momentum</i>	m.s ⁻¹
$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$	Gradiente ente velocidade média e altura	kg.m ⁻³
ρ_a	Densidade do ar	kg.m ⁻³
k_m	Coefficientes de difusividade turbulenta	m.s ⁻¹
k_n	Coefficientes de difusividade turbulenta para o calor	m.s ⁻¹
k_v	Coefficientes de difusividade turbulenta para o vapor	m.s ⁻¹
E	Razão entre o peso molecular de ar seco e ar úmido	-
G	Fluxo de calor no solo	W.m ⁻²

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CLA – Camada limite atmosférica

CNPMS – Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo

DAE – Dia após a emergência

DPV – Déficit da pressão de vapor

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária

FETCH – Distância entre a bordadura da área plantada e o local onde é realizada a mensuração do fluxo CO₂

IRGA – Analisador de gás infravermelho

LBA – Programa de grande escala da biosfera atmosfera na Amazônia

RFA – Radiação fotossinteticamente ativa

TBS – Total de brilho solar

RESUMO

ANDRADE, Vanda Maria Sales de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009. **Relações de dependência entre fluxos de CO₂ e variáveis meteorológicas na cultura de milho (*Zea mays* L.)**. Orientador: José Maria Nogueira da Costa. Coorientadores: Luiz Marcelo Aguiar Sans e Williams Pinto Marques Ferreira.

Um estudo micrometeorológico foi conduzido no campo experimental da EMBRAPA/CNPMS, em Sete Lagoas, MG, no período de outubro de 2008 a fevereiro de 2009, para quantificar as variações diurnas e noturnas das concentrações e dos fluxos de CO₂ entre uma cultura de milho e a atmosfera, utilizando a técnica de covariância dos vórtices turbulentos. Utilizaram-se variáveis meteorológicas relevantes às variações dos fluxos de CO₂, como saldo de radiação, radiação fotossinteticamente ativa (RFA), radiação solar global (Rg), temperatura do ar (Tar), déficit de pressão de vapor (DPV), velocidade do vento (VV), precipitação pluvial (PRP) e temperatura (Tsolo) e umidade do solo (Usolo), para estabelecer relações de dependência entre a magnitude dos fluxos e CO₂, durante os estádios fenológicos da cultura e as variáveis meteorológicas pertinentes. As concentrações de CO₂ médias diárias variaram de 369 a 414 ppm, com valor médio de 391 ppm, durante o período de outubro de 2008 a fevereiro de 2009. As concentrações noturnas de CO₂

variaram de 394 a 454 ppm, com valor médio de 415 ppm. As concentrações médias horárias de CO₂ variaram de 385 ppm (período diurno) a 437 ppm. O fluxo médio de CO₂ durante o período diurno foi de -7,53 μmol.m⁻².s⁻¹. O comportamento dos fluxos noturnos de CO₂, que representam as contribuições de respiração do solo, das raízes e da parte aérea, variou de 1,69 a 2,35 μmol.m⁻².s⁻¹. O saldo de radiação e a radiação fotossinteticamente ativa foram as variáveis que apresentaram maior correlação com os fluxos diurnos de CO₂.

ABSTRACT

ANDRADE, Vanda Maria Sales de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2009. **Dependency relationships between flows of CO₂ and meteorological variables in maize (*Zea mays L.*) crops.** Adviser: José Maria Nogueira da Costa. Co-advisers: Luiz Marcelo Sans Aguiar and Williams Pinto Marques Ferreira.

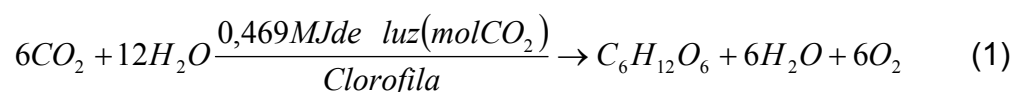
A micrometeorological study was conducted at the experimental farm of EMBRAPA/CNPMS in Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil, from October 2008 to February 2009 to quantify the diurnal and nocturnal variations of concentrations and fluxes of CO₂ amongst a maize crop and atmosphere, using the technique of Eddy Covariance. There had been used meteorological variables relevant to changes in CO₂ streams, such as net radiation, photosynthetically active radiation (RFA), solar radiation (R_g), air temperature (T_{ar}), vapor pressure deficit (DPV), wind speed (VV), rainfall (PRP) and temperature (T_{solo}) and soil moisture (U_{solo}), to establish dependency relationships between the magnitude of flows and CO₂ during the phenological stages of crop and the relevant meteorological variables. The daily average CO₂ concentrations ranged from 369 to 414 ppm, with an average value of 391 ppm within the period from October 2008 to February 2009. Nocturnal CO₂ concentrations ranged from 394 to 454 ppm, averaging 415 ppm. The average hourly concentrations of CO₂ ranged from 385 ppm (daytime) to 437 ppm. The average flow of CO₂ during

the daytime was $-7.53 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. The behavior of nocturnal CO_2 fluxes, which represent the contributions of soil respiration, of roots and shoots, ranged from 1.69 to $2.35 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. The net radiation and photosynthetically active radiation were the variables that presented higher correlation with the diurnal pattern of CO_2 .

1. INTRODUÇÃO

As interações de uma cultura durante o seu ciclo com o ambiente são reconhecidamente complexas, havendo ainda muitos aspectos não suficientemente esclarecidos; dentre esses, destacam-se as limitações ainda existentes sobre as técnicas de medições confiáveis, em condições de campo; e de processos fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, particularmente relacionados com a fotossíntese e a respiração.

As plantas, por meio do processo de fotossíntese, capturam energia solar e a converte em formas utilizáveis em outros níveis da cadeia alimentar, num processo expresso pela equação (1):



A oxidação dos compostos de carbono produzidos na fotossíntese (respiração) libera energia para a execução das várias atividades químicas e biológicas da planta.

O dióxido de carbono é essencial para a fotossíntese e o oxigênio é um produto, enquanto o oxigênio é indispensável para a respiração e o CO₂ é um produto. Por isso, segundo Rosenberg et al. (1983), considera-se a respiração

como o inverso da fotossíntese, apesar de as reações químicas serem diferentes nos dois processos e a clorofila não estar envolvida na respiração.

As fontes de CO₂ para a cultura no campo são provenientes da atmosfera, do solo e da própria planta (parte aérea e raízes). O CO₂ é utilizado nas culturas agrícolas durante o seu ciclo em grandes quantidades, variando de acordo com o estágio fenológico e as condições ambientais. Segundo Monteith (1973), se não fosse o transporte turbulento de calor, vapor d'água, CO₂, O₂ e outros constituintes atmosféricos, uma cultura em pleno desenvolvimento consumiria durante o processo de fotossíntese todo CO₂ existente em uma camada de 30 m acima da cultura em um dia. Todavia, as medições de concentração de CO₂ sobre a cultura apresentam variações diurnas em torno de apenas 15%.

Muitas dificuldades experimentais tiveram que ser superadas para se quantificarem, em condições de campo, as magnitudes desses fluxos entre a cultura e a atmosfera. Dentre essas tentativas bem sucedidas, destaca-se o trabalho de Biscoe et al. (1975), os quais utilizaram técnicas micrometeorológicas do perfil aerodinâmico e da razão de Bowen, para medir os fluxos de CO₂ entre a cultura de cevada e a atmosfera, durante todo o ciclo, complementando com medições de respiração do solo e de raízes. Essas técnicas usadas na avaliação dos fluxos de CO₂ também foram utilizadas na quantificação dos fluxos de calor sensível e calor latente e se baseiam na teoria da similaridade. Apesar do relativo sucesso obtido por vários pesquisadores, foram constatadas dificuldades de se medir com precisão os perfis verticais das variáveis envolvidas, comprometendo o cálculo dos fluxos.

Somente com o desenvolvimento recente de sensores e analisadores de gases mais sensíveis e de rápida resposta, foi possível utilizar-se outra técnica micrometeorológica de medições de fluxos de CO₂, com base na teoria da turbulência, o método de covariância dos vórtices turbulentos. O cálculo dos fluxos de CO₂ por esse método consiste na medição da covariância entre as flutuações na componente vertical de velocidade do vento e a razão de mistura de CO₂. O trabalho de Anderson e Verma (1986) destaca-se entre os trabalhos, usando essa técnica para a cultura do sorgo (MONCRIEFF et AL., 1997). Atualmente, essa técnica micrometeorológica de medições de fluxos de CO₂ vem sendo utilizada em mais de 400 sítios experimentais, em vários

ecossistemas distribuídos na América do Norte, pela rede AmeriFlux (MARGOLIN et al., 2006); na América do Sul, por meio do LBA, Programa de Grande Escala da Biosfera Atmosfera na Amazônia (KELLER et al., 2004); na Europa, pelo Carbo Europe (CIAIS et al., 2005); na Ásia, por meio do Asia Flux (YU et al., 2006); e na África, pela Afri Flux.

Com a utilização da técnica nas medições dos fluxos de CO₂, principalmente em florestas (MONCRIEFF et al., 1997; MALHI et al., 2007), foi que se sentiu a necessidade de se compreender o papel do CO₂ entre outros ecossistemas, como os de culturas agrícolas e atmosfera, que são essenciais para se avaliar a contribuição do ecossistema agrícola no balanço global do CO₂, no presente, e as possíveis mudanças, no futuro, num contexto de aquecimento global.

A agricultura, o aquecimento global e os danos que as mudanças climáticas podem causar na produção agrícola mundial compõem importante ciclo de causas e efeitos. Segundo estudo realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), o Brasil poderá ter prejuízos de até R\$ 7,4 bilhões no seu Produto Interno Bruto (PIB) agrícola em 2020 e ter sua geografia de produção desfigurada, se não tomar alguma atitude contra esses efeitos climáticos

Todavia, medições de fluxos de CO₂ nas culturas agrícolas no Brasil ainda são escassas e, em Minas Gerais, este é o primeiro trabalho realizado com a cultura de milho. A importância de essas medições é permitir melhor compreensão sobre as interações entre as magnitudes desses fluxos associados às respostas fisiológicas da planta, relacionada com as variáveis meteorológicas.

Com este estudo, os objetivos são:

- a) quantificar as magnitudes e as variações dos fluxos e das concentrações de CO₂, durante as fases fenológicas da cultura do milho, usando a técnica de covariância dos vórtices turbulentos; e
- b) analisar a influência de variáveis meteorológicas na magnitude desses fluxos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Milho BR 106

A diversidade genética existente no milho permite o seu cultivo nos mais diversos ambientes. O milho é cultivado desde a latitude 58°N até 40°S, desenvolvendo-se desde o nível do mar até 3.800 m de altitude (HALLAUER; MIRANDA FILHO, 1988).

Em 1985, a variedade de milho BR 106 teve seu lançamento comercial, sendo geneticamente melhorado a cada ano, por meio de ciclos de seleção, que proporcionam ganhos em uniformização de plantas, empalhamento de espigas e, principalmente, produtividade de grãos. De elevado potencial produtivo e alcance social, o BR 106 possui porte de 2.40 m e ciclo intermediário de 130 dias (Tabela 1).

Por se tratar de uma variedade mais rústica, o BR 106 possui menor custo de semente e apresenta boa estabilidade de produção e adaptabilidade a todas as regiões brasileiras e resistência ao acamamento e ao ataque das principais pragas. É um milho ao alcance de todos os produtores brasileiros, independentemente do seu nível tecnológico, econômico ou social (NOCE, 2004).

Tabela 1 - Características agronômicas do milho BR 106

Tipo	Variedade
Ciclo	Semiprecoce
Florescimento	65 dias
Época de plantio	Normal e safrinha
Uso	Grão e silagem da planta inteira
Maturação	130 dias
Altura da planta	240 cm
Altura da espiga	135 cm
Densidade (planta/ha)	40-50
Cor	Amarelo-ouro
Textura do grão	Sedimentação
Tolerância ao acamamento	Muito bom
Tolerância ao quebramento	Muito bom
Produtividade média	5.500 kg.ha ⁻¹
Adaptação	Brasil exceto RS

Fonte: Embrapa Milho e Sorgo (NOCE, 2004).

2.2. Estádio fenológico do milho

Os estádios fenológicos são subdivisões dentro de um subperíodo; são momentos específicos dentro do ciclo do milho, que podem coincidir com fases, quando envolvem mudanças importantes. Os estádios surgiram pela necessidade de detalhar de maneira clara e objetiva as etapas de desenvolvimento das plantas, na elaboração das chamadas escalas fenológicas. A caracterização fenológica por meio de estádios permite maior detalhamento na descrição do ciclo da planta, em relação à utilização das fases, já que essas podem ser demasiadamente distanciadas no tempo.

A necessidade crescente de uma caracterização fenológica detalhada e com critérios claros fez surgir uma série de escalas fenológicas, atualmente em uso, para melhor compreensão do desenvolvimento da planta de milho. NA Figura 1, está representado o desenvolvimento da planta de milho e seus estádios.

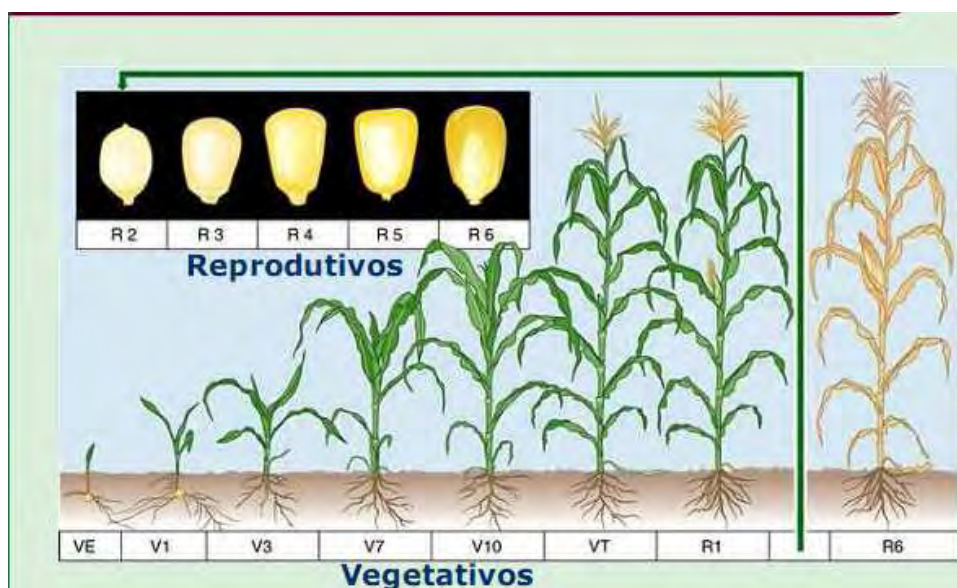


Figura 1 - Representação dos estádios da planta de milho.

Os estádios do milho BR 106, plantado na Embrapa no período de 3 de outubro de 2008 a 13 de março de 2009, evidenciaram o ciclo apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Datas referentes a cada (EF) estágio fenológico e os dias juliano (DJ) do milho BR 106

EF	DJ	Data	Estádios
VE	281	07/10/2008	Emergência
V4	296	23/10/2008	Quatro Folhas
V8	315	10/11/2008	Oito Folhas
V12	329	24/11/2008	Doze Folhas
VT	344	09/12/2008	Florescimento
R1	353	18/12/2008	Embonecamento
R2	361	26/12/2008	Bolha d'água
R3	4	04/01/2009	Grão leitoso
R4	16	16/01/2009	Grão pastoso
R5	26	26/01/2009	Formação de dentes
R6	34	03/02/2009	Maturação fisiológica

A adaptação de um cultivar de milho e seu desenvolvimento e estádios a certo local é determinado por fatores biofísicos, que interferem direta e indiretamente no crescimento da planta.

2.3. Instrumentos de mensuração das variáveis ambientais radiação solar global ($W.m^{-2}$)

O instrumento capaz de realizar medidas da radiação solar global é denominado genericamente de radiômetros e dependendo da região espectral apresenta um nome mais específico. Um tipo comumente utilizado é o piranômetro modelo SP-LITE, que é fabricado pela empresa Kipp & Zonen e possui um elemento sensor constituído de fotodiodo de silício, que responde à radiação da faixa de 0,3 a 4,0 μm (Figura 2).

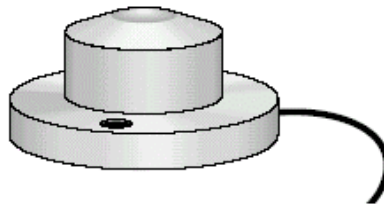


Figura 2 - Piranômetro modelo SP LITE.

2.3.1. Radiação fotossinteticamente ativa – PAR ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$)

Pode ser medida por um instrumento simples, composto por um detector fotovoltaico de silício, com tempo de resposta de 10 μs , que pode ser utilizado sob condições de temperatura variando entre -40 e $65^{\circ}C$ (Figura 3).

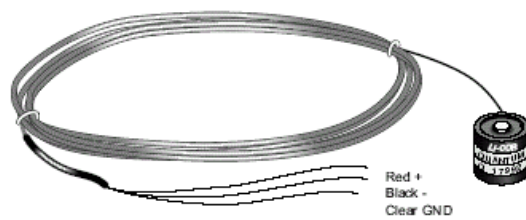


Figura 3 - Detector fotovoltaico de silício.

2.3.2. Saldo de radiação solar ($W.m^{-2}$)

Pode ser medido com base num sensor de termopilhas, capaz de realizar as medidas da soma algébrica de todos os comprimentos de onda de radiação, incidente e refletida. Constituído por 60 junções de termopilhas com baixa resistência elétrica (4Ω), esse sensor é capaz de reduzir a suscetibilidade de ruídos durante as medições (Figura 4).

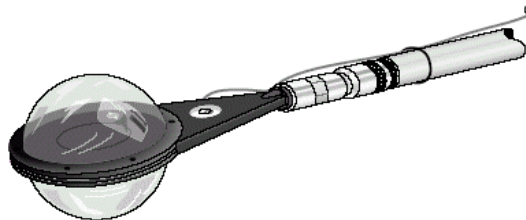


Figura 4 - Saldo de radiação Q-7.1.

2.3.3. Temperatura ($^{\circ}C$) e umidade relativa do ar (%)

Ambos os elementos meteorológicos são comumente mensurados, por meio de um termo-higrômetro, sendo um dos mais comuns o modelo HMP45C. Esse termo-higrômetro possui um elemento termo resistivo (resistência varia com a temperatura) e um elemento sensível à umidade (capacitivo). Tal sensor

é protegido contra a radiação e precipitação e tem ampla utilização mundial (CAMPBELL, 2007; LSI-LASTEM, 2007) (Figura 5).

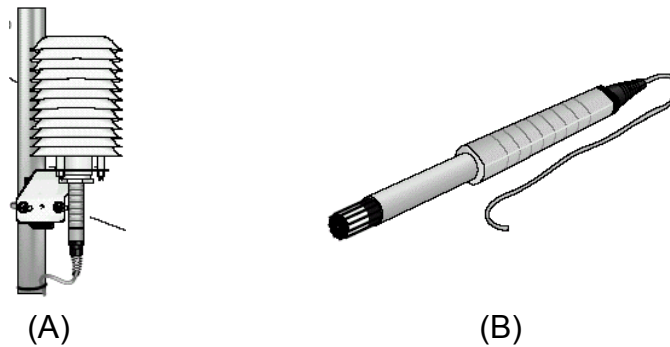


Figura 5 - Higrômetro, abrigo do sensor B (A); e sensor HMP45C (B).

2.3.4. Temperatura do solo (°C)

Semelhante ao sensor que mensura a temperatura do ar, o instrumento que mensura a temperatura do solo também apresenta um elemento sensor termo resistivo, termistor, que é semicondutor sensível à variação de temperatura do meio em que está inserido, capaz de mensurar temperaturas na faixa de -35°C a $+50^{\circ}\text{C}$. Esse instrumento por estar em contato direto com o solo deve ser devidamente aterrado (Figura 6).



Figura 6 - Sensor de temperatura do solo.

2.3.5. Direção e velocidade do vento

O vento, considerado também elemento meteorológico, é medido pelo instrumento chamado anemômetro, sendo o modelo 03001-*Wind Sentry* um dos mais comuns. Esse modelo é capaz de medir a direção do vento, com exatidão de aproximadamente 1,3%, 5°, entre os ângulos de 0° e 360°, e a velocidade, com exatidão de aproximadamente $\pm 1\%$ ($+0,5 \text{ m.s}^{-1}$), entre a velocidade de 0 e 50 m.s^{-1} , além de rajadas de até 60 m.s^{-1} (Figura 7).

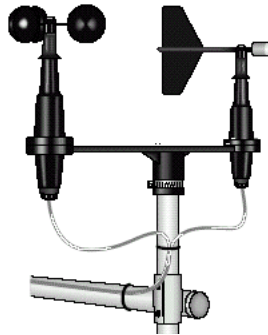


Figura 7 - Anemômetro.

2.3.6. Precipitação pluvial (mm)

Os pluviógrafos são os instrumentos indicados para medidas desse elemento meteorológico. O modelo CS 700-L é atualmente o utilizado, pois, apesar de ter sido desenvolvido para serviços hidrológicos, foi modificado para o uso de *datalogger*, da Campbell. A captação da chuva é feita pelo instrumento que tem formato de funil de 7,87" (200 mm). As medidas são feitas por meio de pulsos detectados pelo *datalogger*, conforme o número de vezes que a balsa interna é movimentada na faixa de medição de 0 a 500 mm.h^{-1} (Figura 8).

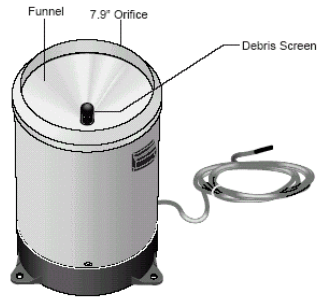


Figura 8 - Pluviógrafo modelo CS 700-L.

2.3.7. Datalogger CR10 X

O CR10 X é um módulo compacto de coletor de dados (Figura 9), totalmente programável e construído em um módulo metálico de alta rigidez mecânica e elétrica. O acesso à programação e ao controle da CR10 X é feito por meio de um teclado/display (CR10KD) ou via comunicação serial (direta ou *modem*) com um microcomputador, no modo de telecomunicações. O *datalogger* contém entradas analógicas e digitais e o sistema é alimentado por uma fonte de corrente contínua, com tensão de entrada de 12 V e de saída para alimentação dos sensores de 5 V, com memória interna de 64 K *bytes*.

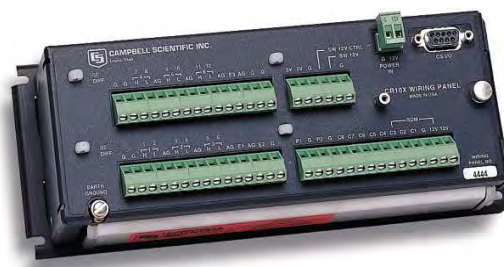


Figura 9 - Datalogger CR10X Campbell Scientific.

2.4. Equipamentos para medições dos fluxos de CO₂

A mensuração dos fluxos de CO₂ pode ser realizada por meio da técnica de covariância dos vórtices turbulentos e de equipamentos como o anemômetro sônico, o analisador de gás infravermelho e o sistema edisol.

A técnica de covariância dos vórtices turbulentos, utilizada para medir os fluxos de CO₂ acima da cultura, usando o sistema edisol, foi desenvolvida por Moncrieff et al. (1997). O sistema é composto por um anemômetro sônico tridimensional, que mede instantaneamente as três componentes do vento, e um analisador de gás a infravermelho.

O analisador de gás (modelos LI-6262, LI-COR Inc. e Lincoln, NE, USA) permite medir de forma contínua os fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente, por meio de movimentos turbulentos sobre produção mecânica e térmica. Esse sistema é considerado de um circuito fechado (Figura 10).

As componentes da velocidade do vento “u”, “v” e “W” foram medidas, utilizando-se o anemômetro sônico tridimensional Solent (A1012R, Gill Instruments, Lymington, UK), considerado de alta frequência 21 hz, que mede toda e qualquer movimentação turbulenta, seja ela pequena ou grande, no intervalo considerado de 30 minutos.

De acordo com a geometria do sensor, o anemômetro é composto de três pares de transdutores, usados para medir a velocidade do vento “u”, “v” e “w” e a velocidade do som “c” (Figura 11).

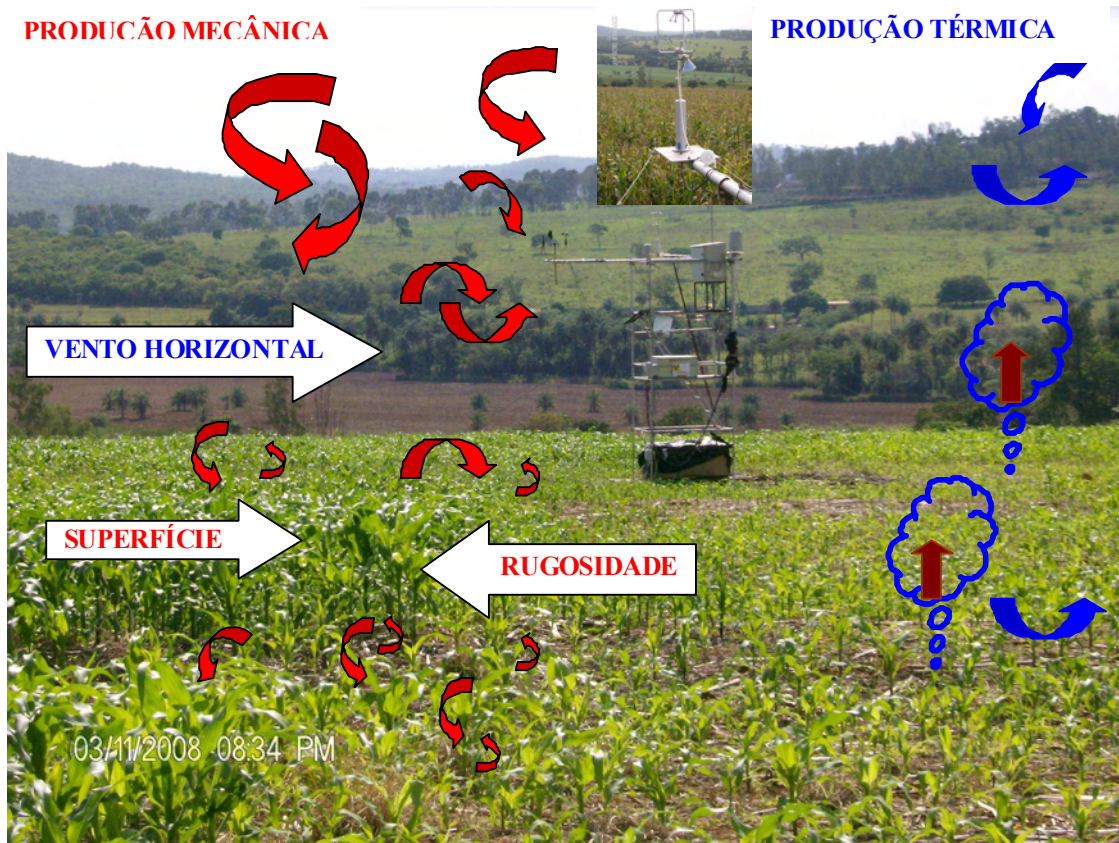


Figura 10 - Destaque demonstrativo dos movimentos turbulentos e térmicos, medidos pela técnica de *Eddy Covariance*.

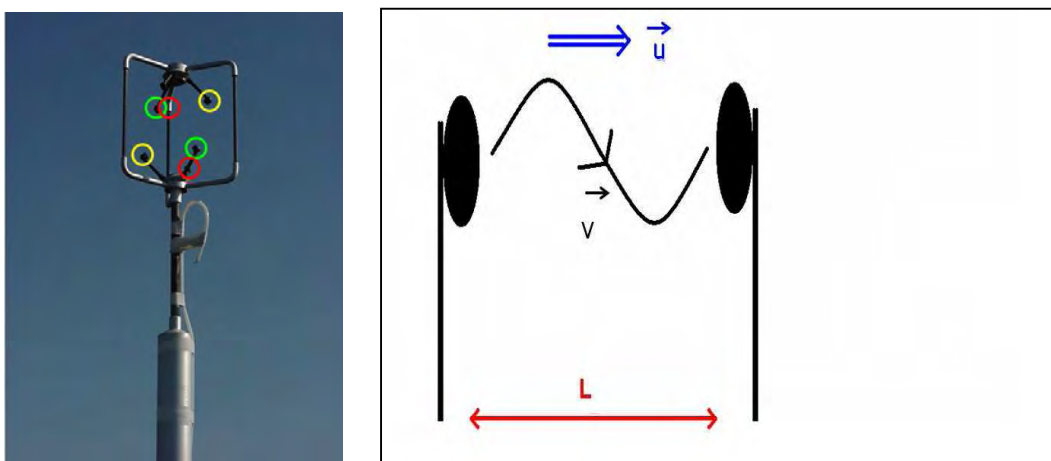


Figura 11 - Destaque dos transdutores no interior do anemômetro sônico e esquema de medição do vento entre os tradutores.

2.4.1. Analisador de gás LI-6262

O analisador de gás infravermelho (IRGA) fornece as concentrações de CO₂ e vapor d'água com tempo de resposta de 0,1 s. A teoria é baseada na determinação da absorção da radiação infravermelha (IR), a partir da passagem do ar sobre células no analisador que as detectam. Os fluxos de dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água (H₂O) são medidos com base na diferença da radiação infravermelha, por meio da passagem de duas células de amostra de gás. A capacidade máxima de escoamento no analisador é de 10 l/min. Pequenas alterações na pressão atmosférica afetam a calibração do IRGA, sendo necessárias aferições, em média a cada três dias.

As calibrações do IRGA, para a medição dos gases para o CO₂ e H₂O, são realizadas com a utilização de um método químico, que consiste na utilização de dois filtros por onde passam o ar, que contêm soda lime e hipoclorato de magnésio. Esses produtos químicos têm a finalidade de retirar da tubulação cada célula de H₂O e CO₂, que não serão utilizados, e, assim, fazer um “zero”, uma limpeza em cada célula.

2.4.2. Princípio de funcionamento do analisador de gás LI-6262

O analisador de gás IRGA 6262 é composto por uma câmara de referência e uma de amostra; a de referência é usada por um gás de concentração conhecida, em geral o nitrogênio, e a de amostra, para medir o gás da amostra de concentração desconhecida (natural). A radiação é transmitida alternadamente para cada caminho da câmara e a análise é proporcional à diferença de absorção entre os dois gases (Figura 12).



Figura 12 - Analisador de gás Li-Cor 6262.

Dois detectores são necessários para separar as concentrações de H_2O e CO_2 , que medem simultaneamente as concentrações de CO_2 e vapor d'água da amostra. Um *Splitter* de viga distribui o caminho da radiação infravermelha para os dois detectores, a fim de medir essas concentrações, por meio da absorção da radiação infravermelha. Ambos os detectores são solenoides de chumbo, dispositivos sólidos e resistentes à vibração, que são resfriados até -5°C , para manter a sensibilidade constante e reduzir o nível de ruído. O detector de CO_2 usa um filtro de interferência ótica a $4,26 \mu\text{m}$, com um *bandpass* de $0,15 \mu\text{m}$, e o de vapor d'água, um filtro semelhante a $2,59 \mu\text{m}$, com um *bandpass* de $0,05 \mu\text{m}$. O *software* do LI-6262 corrige as medidas de CO_2 pela diluição desse gás na presença de vapor d'água.

O ar é arrastado através do analisador por sucção e bombeamento; o vidro-tampão (*fluxímetro*) funciona para reduzir flutuações na linha de amostra. O material da área de amostra não interage com o CO_2 e o vapor d'água de referência. O comprimento do tubo tende a ser analisado para evitar o chamado *Lag*, que é um retardo na medição e no armazenamento, em função

do comprimento do tubo. O diâmetro do tubo afeta a velocidade do fluxo e diminui a pressão e a energia requerida para arrastar o ar pelo sistema.

O controlador do fluxo de massa mantém a velocidade de fluxo dentro de uma pequena variação, garantindo que o tempo de passagem para qualquer amostra de ar permaneça aproximadamente constante. Um feixe de luz incide no tubo ótico, dividindo-se em feixe de luz infravermelha para dois detectores solenoides. O sistema, então, utiliza um *software* especial que calcula a concentração de vapor d'água e CO₂, com base na absorvidade desses gases pela radiação infravermelha. O volume do tubo ótico é de 11,9 cm³ e a velocidade do fluxo máximo no tubo do analisador não deve exceder 10 l.min⁻¹. Normalmente, o gás é arrastado pelo analisador em um fluxo de velocidade 6 l.min⁻¹, que é o recomendando por alguns grupos que operam com essa velocidade de fluxo; porém, velocidade mais elevada pode garantir um fluxo totalmente turbulento em linha de amostragem. O processo integrado da medição dos fluxos de CO₂ sobre uma cultura agrícola é observado na Figura 13.

2.5. Processamento de dados

O processamento dos dados de CO₂ e H₂O em campo pode ser realizado por meio da utilização do *software Eddymeas* que é uma aplicação desenvolvida para o *Windows*, escrita na linguagem *Visual Basic*.

De modo geral, por meio de uma interface gráfica, configuram-se os sinais de saída do anemômetro, a frequência de medição, a média pretendida, bem como são introduzidos os intervalos das concentrações de H₂O e CO₂ previamente definidos. Outras informações, como a altura de medição, altitude, podem também ser configuradas no *Eddyflux* (Figura 14).

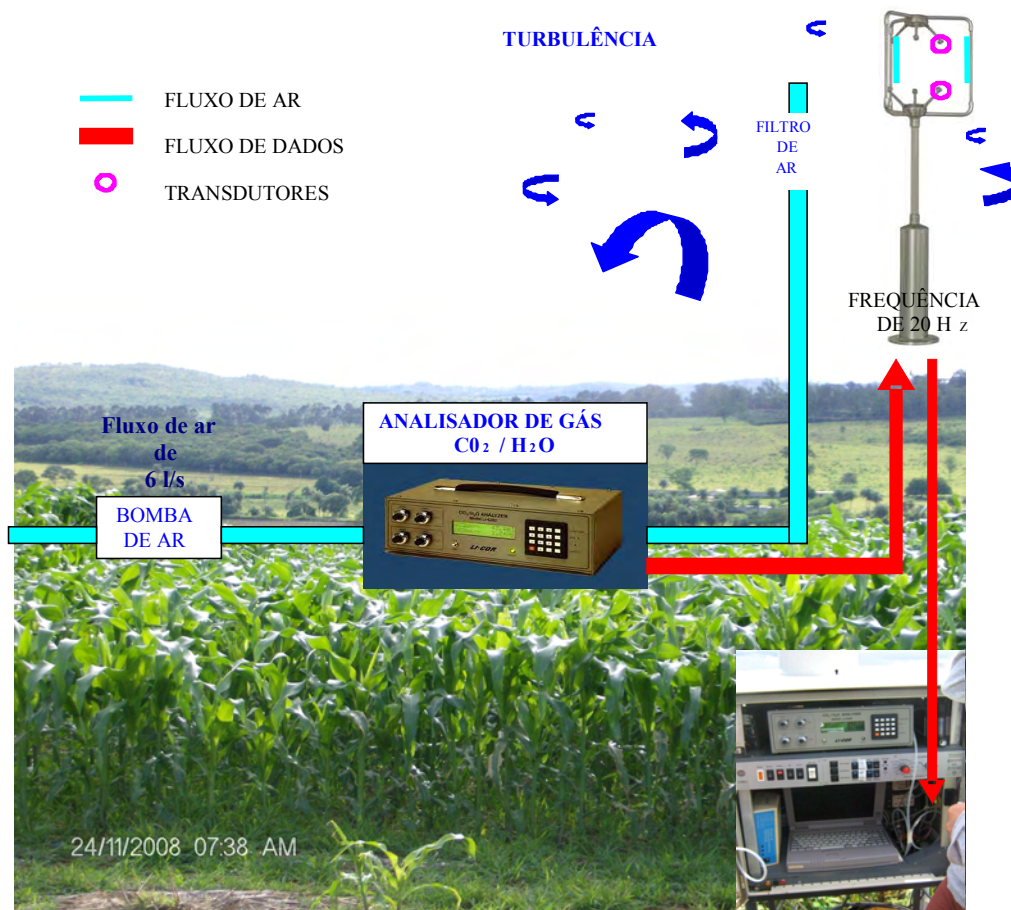


Figura 13 - Destaque demonstrativo sobre a cultura, nas medições dos fluxos de CO₂, utilizando a técnica *Eddy Covariance*, por meio do sistema edisol.

Dentro das configurações, as que parecem importante se destacar são a frequência de medição e a média, que foram definidas para 20 Hz e 30 minutos, respectivamente, escolhidas de acordo com as recomendações da comissão científica do projeto *CARBOEUROPE*. Uma vez configurado, o *software* está apto para apresentar uma nova interface gráfica, especialmente desenvolvida para a aquisição de dados, a evolução temporal dos valores médios dos fluxos (não corrigidos), entre outras variáveis. Como a sua função principal é aquisição de dados, esse *software* cria e guarda no disco do computador arquivos *.slt, que contêm os dados turbulentos no formato binário, para um processamento posterior.

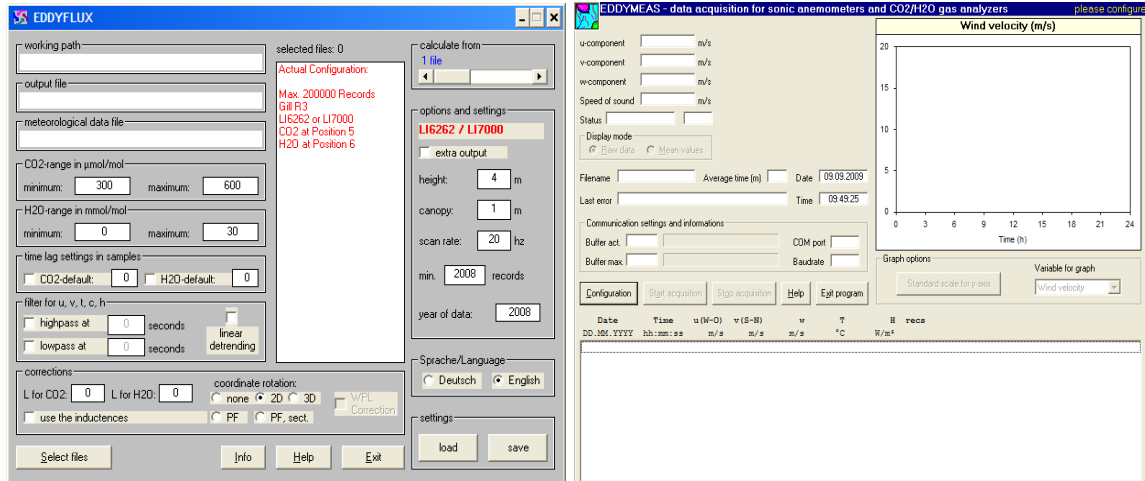


Figura 14 - Imagem dos softwares de processamento dos dados (*Eddyflux* e *Eddyflux*).

2.6. Camada limite atmosférica

A camada limite da atmosfera é caracterizada por um conjunto de movimentos turbulentos, ascendente e descendente, que transportam energia e massa na vertical. Na atmosfera, encontram-se determinadas camadas que se subdividem, de acordo com o efeito que a superfície terrestre provoca no movimento do ar. A primeira região da atmosfera, denominada de Camada Limite Atmosférica (CLA), próxima à superfície terrestre, é diretamente influenciada pela superfície; e, a segunda região, a atmosfera livre, mais acima, não sofre a influência direta da superfície terrestre (VAREJÃO, 2001).

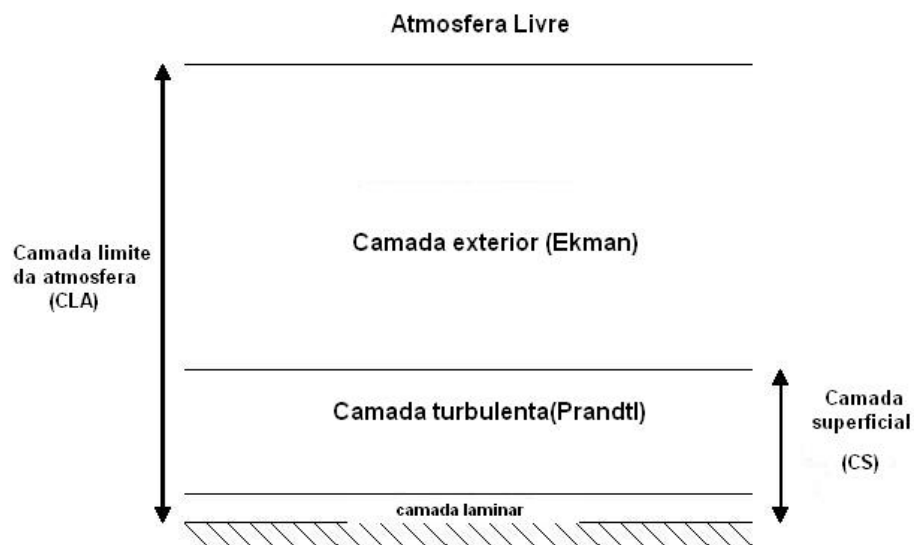
A parte mais baixa da atmosfera é determinada principalmente pelas trocas de massa e energia com a superfície. Essa porção, denominada de Camada Limite Atmosférica (CLA), caracteriza processos de emissão ou absorção que acontecem na superfície (MORAES et al., 2007).

A CLA é a região da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície terrestre e responde a ação combinada de forçantes mecânicas e térmicas (STULL, 1988).

A natureza turbulenta é uma das principais características da CLA, que é gerada pela convecção térmica (energia solar) e mecânica (vento). No

decorrer do dia, com o aquecimento da superfície e com os movimentos convectivos, a profundidade da CLA aumenta entre 1 e 2 km. À noite, em razão do resfriamento radiativo da superfície, o que resulta na redução da turbulência ou até mesmo por não haver quase nenhum movimento, a altura nessa camada se torna bem mais fina.

A camada limite da atmosfera pode ser idealizada pela camada superficial e pela exterior (ou de *Ekman*), de acordo com a influência da rotação do planeta Terra (Figura 15). A camada exterior estende-se normalmente a uma altura que varia de 500 a 1.000 m, onde o escoamento atmosférico é influenciado não só pela rugosidade da superfície e pelo gradiente de temperatura, mas também pela rotação da Terra (KAIMAL; FINNIGAN, 1994); e a superficial, a uma altura que pode variar de 50 a 100 m, onde o escoamento atmosférico é interferido pela rugosidade da superfície e pelo gradiente de temperatura.



Fonte: Adaptado de Peixoto e Oort (1991).

Figura 15 - Estrutura vertical da camada limite da atmosfera.

Na superfície, a camada nas primeiras dezenas de metros (20-60 m, dependendo das características da superfície e da estratificação) é conhecida como Camada Superficial (CS). Essa camada é caracterizada pelo fato de os fluxos turbulentos serem aproximadamente constante com a altura. É a camada de maior interesse para a micrometeorologia, pois o movimento do ar é normalmente irregular e é caracterizado por flutuações, vórtices ou turbilhões. Às vezes o fluxo de ar nessa camada pode não ser irregular, mas o comportamento das propriedades das médias, como velocidade do vento, umidade, temperatura do ar e concentração de CO₂, pode ser examinado estatisticamente. O comportamento dos fluxos turbulentos nessa camada contribui para o conhecimento da influência das propriedades médias sobre as atividades produtivas na agricultura e na contribuição da floresta Amazônica no ciclo global do carbono. Normalmente, são considerados períodos adequados para a análise estatística de aproximadamente 30 minutos a 1 hora, mas hoje já há discussões sobre que período seria o mais adequado para essa análise em cada ecossistema.

Na camada superficial (CS), podem ainda ser individualizadas duas camadas, a turbulenta (ou de *Prandtl*) e a laminar. A turbulenta é caracterizada por turbulência de pequena escala totalmente desenvolvida, criando uma mistura praticamente homogênea dos constituintes atmosféricos. Nessa camada, a variação vertical do transporte vertical, ou fluxo de energia ou massa, é inferior a 10%. Por isso, é usualmente chamada de camada de fluxo constante (OKE, 1987; PEIXOTO; OORT, 1991). A laminar consiste numa camada onde o escoamento atmosférico adquire um padrão laminar e o transporte vertical de energia e massa é efetuado por difusão molecular. A sua espessura é de apenas alguns milímetros, ou menos, variando de acordo com a velocidade do vento e a rugosidade da superfície. A altura da camada limite da atmosfera varia em razão da intensidade da turbulência gerada à superfície (OKE, 1987). A turbulência, definida como um conjunto de turbilhões de vários tamanhos sobrepostos uns nos outros, pode ter origem mecânica e térmica (STULL, 1988).

Segundo Pinto (2003), na camada superficial, as condições estáveis são características do período noturno (Camada Limite Estável). No decorrer do dia, a atmosfera é, em geral, instável (Camada Limite Convectiva), quando

predominam os processos convectivos. A condição neutra é geralmente nos períodos de transição, nas primeiras horas do dia ou da noite.

No período da noite, quando geralmente não há convecção, o principal mecanismo gerador de turbulência é o vento. No entanto, esse mecanismo também se estabelece de dia, de tal forma que há uma contribuição na produção mecânica, na geração dos vórtices turbulentos (PINTO, 2003).

Segundo Fisch (1995), a evolução da Camada Limite Atmosférica, Camada Limite Superficial e Camada Limite Noturna estão diretamente ligadas à quantidade de energia disponível na superfície.

2.7. Variações nas concentrações de CO₂ na atmosfera

O crescente aumento no uso de combustíveis fósseis e nas taxas de desmatamento tem sido geralmente destacado como a principal causa pelo aumento nas concentrações de CO₂ atmosférico, sendo esse um dos gases do efeito estufa e, segundo Keeling et al. (1976), é o que apresenta maior contribuição a esse fenômeno natural. Segundo Stern (2007), a concentração de CO₂ atmosférico tem aumentado de 280 ppm (antes da revolução industrial) até em torno de 430 ppm nos dias atuais. Embora haja muita controvérsia sobre as consequências desse aumento nas mudanças climáticas, alguns pesquisadores preveem aumento do aquecimento global, com base em simulações de modelos climáticos. Todavia, pouco se conhece sobre as consequências desse possível aquecimento global sobre o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas.

O monitoramento das concentrações de CO₂ atmosférico foi iniciado em 1958 por Keeling et al. (1976) em Mauna Loa, Hawái, com o objetivo de quantificar as emissões de CO₂ do planeta, ao mesmo tempo em que possibilita estimar as possíveis influências da industrialização e da crescente urbanização na variação dessas emissões. Daí a necessidade de se obterem dados experimentais dessas concentrações de CO₂ para diferentes culturas, a fim de se ampliar o entendimento da contribuição da exploração agrícola nessas variações.

Variações diurnas de CO₂ atmosférico são observadas em consequência das trocas de CO₂ entre os ecossistemas e a atmosfera,

expressas pelo balanço entre a fotossíntese e a respiração das plantas, raízes e solo. Também têm sido observadas variações sazonais na concentração de CO₂ atmosférico em diferentes latitudes e altitudes, em consequência da atividade fotossintética durante a estação de crescimento e respiração das plantas e do solo, durante todo o ano. A maioria dos estudos sobre a influência das variações nas concentrações de CO₂ sobre a fotossíntese tem sido feita sob condições controladas. Segundo Bazzaz (1990), as respostas da fotossíntese ao aumento na concentração de CO₂ reduzem ou eliminam completamente a fotorrespiração; as plantas de C₃ respondem mais a esse aumento do que as plantas C₄; as taxas de fotossíntese tendem a aumentar com a elevação da concentração de CO₂, porém esse aumento pode diminuir com o tempo.

Segundo Bazzaz (1990), pouca informação é disponível sobre os efeitos da elevação na concentração de CO₂ atmosférico nas taxas de respiração das culturas. Todavia, a maioria dos estudos indica redução na condutância estomática com o aumento na concentração de CO₂ atmosférico. Segundo Tolley et al. (1985), a resposta estomática às concentrações de CO₂ varia muito entre as espécies vegetais e pode ser influenciada por outros fatores ambientais como os níveis de radiação solar e o teor de umidade no solo. O decréscimo da condutância estomática causa diminuição nas taxas de transpiração e, segundo Reekie e Bazzaz (1989), vários estudos demonstram aumento na eficiência de uso da água das culturas. A interação das concentrações de CO₂ com a temperatura é crítica para um melhor entendimento sobre as consequências nas taxas de fotossíntese e de respiração, justificando-se a necessidade de experimentos de campo para avaliar essas interações.

2.8. Estratégias para medições e modelagem dos fluxos de CO₂ em culturas agrícolas

Medições dos fluxos de CO₂ entre culturas agrícolas e a atmosfera são essenciais para se avaliar a contribuição dos ecossistemas agrícolas no balanço global do CO₂ no presente, bem como as possíveis mudanças no futuro, num contexto de aquecimento global. Essas medições são úteis para se

entender as magnitudes e variações sazonais das taxas de assimilação de CO₂ pelas culturas, assim como as perdas respiratórias, e identificar as variáveis ambientais mais relevantes que influenciam a magnitude desses fluxos. Esses dados podem ser utilizados no desenvolvimento e na validação de modelos mecanísticos relacionados com o efeito das variáveis ambientais nos processos de fotossíntese e respiração da cultura em condições de campo.

Diante das evidências do aumento das concentrações de CO₂ atmosférico, em razão das atividades humanas com as possíveis consequências de mudanças no clima, e considerando-se que pouco se sabe sobre a magnitude dos potenciais impactos desse aumento de CO₂ na biosfera, é fundamental que se quantifique experimentalmente as magnitudes desses fluxos nas diversas culturas agrícolas. É esperado que o balanço entre os processos respiratórios e de assimilação de CO₂ das culturas seja alterado num contexto de mudanças climáticas, com consequências na duração da estação de crescimento (BALDOCCHI et al., 2001). As medições experimentais desses fluxos e os modelos resultantes poderão ser usados para interpolar, extrapolar ou mesmo prever as possíveis consequências nas produtividades das culturas agrícolas. Essas medições, segundo Robertson et al. (2000), são críticas para melhorar as análises sobre o potencial da agricultura em mitigar os crescentes aumentos na concentração de CO₂. Esses dados também poderão ser úteis na validação de dados do monitoramento por satélite de fenologia e produção primária líquida das culturas em larga escala (XIAO et al., 2004). Portanto, as informações sobre os fluxos de CO₂ das culturas agrícolas são essenciais não apenas para aperfeiçoar esses modelos em diferentes escalas de empirismo e processos, como as taxas de fotossíntese e respiração, mas também contribuir para a melhor compreensão dos ecossistemas agrícolas em escala global.

2.9. Técnicas micrometeorológicas utilizadas nas medições de fluxos de massa e de energia

As trocas de massa e de energia entre uma cultura e a atmosfera são fortemente influenciadas pelos processos turbulentos na camada limite de superfície. Dentre os métodos micrometeorológicos desenvolvidos para avaliar

as trocas de massa e de energia entre a superfície cultivada e a atmosfera destacam-se as técnicas aerodinâmicas, razão de Bowen e covariância dos vórtices turbulentos.

2.9.1. Método aerodinâmico

O método aerodinâmico é uma aplicação da Lei de Difusão de Fick à atmosfera turbulenta. Esse método baseia-se na existência de uma relação entre uma densidade de fluxo (massa/energia por unidade de área e tempo) de um constituinte atmosférico e seu gradiente acima da superfície da cultura, sendo, por isso, também conhecido como Método do Gradiente de Fluxo.

Toda complexidade e incertezas dos transportes turbulentos pelo método aerodinâmico estão relacionadas com o coeficiente de difusividade turbulenta “k”. Erros do método aerodinâmico no cálculo de fluxos de massa e de energia estão associados às medições no gradiente dos constituintes estudados. Sinclair et al. (1975) e Verma e Rosenberg (1975) conduziram uma análise de erros desse método e concluíram que podem atingir de 30% a 40%, quando o sistema de medição não consegue medir satisfatoriamente os gradientes verticais, especialmente em vegetação de grande porte como florestas, por causa da eficiência da mistura turbulenta. As maiores restrições de utilização desse método em culturas agrícolas estão associadas às dificuldades de medições precisas dos gradientes médios dos constituintes acima da superfície, exigências de “fetch” e incerteza nas funções usadas nas correções de estabilidade atmosférica.

Trabalhos experimentais que utilizaram a técnica aerodinâmica ocorreram principalmente nas décadas de 1960 e 1970: Monteith e Szeicz (1960), para a cultura de beterraba; Denmead (1960), para a de trigo; Brown e Rosenberg (1971), para a de beterraba; Biscoe et al. (1975), para a de cevada; Baldocchi et al. (1981), para a de alfafa; e Baldocchi et al. (1981), para a de soja.

2.9.2. Método do balanço de energia – razão de Bowen

Tem sido um dos mais usados na determinação de fluxos evaporativos em vários tipos de superfícies utilizados. Recentemente, esse método também vem sendo aplicado ao fluxo de CO₂. A razão de Bowen foi introduzida por Bowen (1960) e consiste na relação entre os fluxos de calor sensível e calor latente; mostra-se bem confiável para estimativas de evaporação; porém, segundo Verma e Rosenberg (1975), grandes erros na determinação dos coeficientes “k” podem ocorrer quando os valores de Rn e os gradientes de pressão de vapor e temperatura são pequenos.

Esse método apresenta certas vantagens para medições de fluxos de calor latente em condições de campo, em virtude das exigências instrumentais serem relativamente simples e não serem necessários instrumentos de resposta rápida (ROSENBERG, 1983). Aplicações bem sucedidas desse método têm sido feitas em vários tipos de vegetação (culturas agrícolas, pomares e florestas). Fritschem et al. (1985) e Fritschem e Quim (1990) obtiveram ótimos resultados sobre fluxos de calor sensível e calor latente, usando esse método, bem como Angell et al. (2001) sobre fluxos de CO₂ em gramíneas.

2.9.3. Método de covariância dos vórtices turbulentos

As primeiras medições de fluxos usando a técnica de covariância dos vórtices turbulentos ocorreram no início da década de 1970 sobre a cultura de milho (DESJARDIN; LEMON, 1974). Outros estudos importantes usando essa técnica foram utilizados como os de Anderson et al. (1994) com a soja; Anderson e Verma (1986) com o sorgo; e Ohtaki (1984) com o arroz. A partir de então, as medições de fluxos de CO₂ usando essa técnica começaram a ser feita em outros ecossistemas: Verma et al. (1986), em florestas temperadas; Fan et al. (1990), em floresta amazônica; e Andrade (2005), em floresta de mangue amazônico.

Segundo Wilson et al. (2002), dois tipos de erros sistemáticos afetam as medições de covariância dos vórtices turbulentos. Um deles é a falta do

fechamento do balanço de energia e o outro está associado com a sustentabilidade dos fluxos noturnos, sob condições de baixa velocidade do vento, conforme foi verificado por Malhi et al. (1998). Segundo Law et al. (2002), uma das prioridades de pesquisa nessa área é a partição das trocas líquidas de carbono do ecossistema em seus componentes de fluxos de assimilação e de respiração e em diferentes ecossistemas e escalas temporal e espacial. Essas informações são essenciais para o desenvolvimento e validação de modelos mecanísticos sobre as trocas de CO₂ e a vegetação e a atmosfera em uma ampla faixa de condições ambientais.

O método das correlações turbulentas (*Eddy Correlation*) é uma técnica micrometeorológica que foi desenvolvida na década de 1950, mas somente na de 1990, com o desenvolvimento de sistemas de medição de maior desempenho, é que passou a ser mais largamente utilizada, mais especificamente entre os anos de 1992 e 1995 com os trabalhos realizados por Moncrieff et al. (1997).

Os movimentos turbulentos são responsáveis pelo transporte de calor, *momentum*, umidade, gases e partículas (muitas vezes denominados escalares) no interior da camada limite planetária. Esses são gerados por vórtices mecânicos (atrito) e térmicos (convecção). A turbulência é um fenômeno intrinsecamente não linear e só pode ser analisada por meio de ferramentas estatísticas. As variações, com períodos da ordem de horas, estão associadas a processos de mesoescala ou de escala sinótica. Os processos turbulentos são associados a variações com períodos da ordem de minutos ou segundos. A intensidade da turbulência está relacionada à amplitude da variação da velocidade do vento em torno da média.

Utilizando o método de covariância dos vórtices turbulento, Aires et al. (2008), em pesquisa realizada com pastagem; Malhi et al. (1998), estudando floresta; e Andrade (2005), trabalhando em floresta de Mangue, recomendam o intervalo de tempo médio de 30 minutos de coleta de dados para a melhor caracterização dos movimentos turbulentos em sistemas florestais e agrícolas.

A aleatoriedade dos fenômenos turbulentos impede uma descrição determinística, de modo que se torna necessária a utilização de ferramentas estatísticas, que permitam descrever comportamentos médios. Essas ferramentas permitem, de certa forma, “organizar” os sinais turbulentos,

atribuindo significados físicos às propriedades observadas. Para isso, os sinais turbulentos devem ser separados dos sinais originais, sendo posteriormente processados pelo cálculo de variância, covariância e espectros de frequência.

Costa (2003) descreve que os parâmetros estatísticos que são usados no estudo da turbulência são variância, desvio-padrão e covariância.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido em uma área de 38 ha, denominada, *pivot 3*, pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), localizada no município de Sete Lagoas, MG, coordenadas 19°27'85"S e 44°10'58"W e altitude de 735 m (Figura 16). O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é Cwa (Subtropical ou Temperado Quente), com períodos secos no inverno e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

3.2. O experimento

O experimento teve início com o plantio do cultivar de milho BR106 no dia 3 de outubro de 2008, tendo sido concluído com a colheita realizada em 11 de março de 2009.

Foi utilizado o sistema de plantio direto, iniciado com 0,7 m entre fileiras e 0,2 m entre plantas, totalizando 55.000 plantas.ha⁻¹. Após o plantio, houve aplicação de nitrogênio (N) por cobertura de 0, 40, 80 e 120 kg.ha⁻¹, na forma de sulfato de amônia, adubação nitrogenada com ureia fertilizante a 200 kg.ha⁻¹, no dia 07/11/2008. O solo da área experimental é Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (VIANA, 2005).

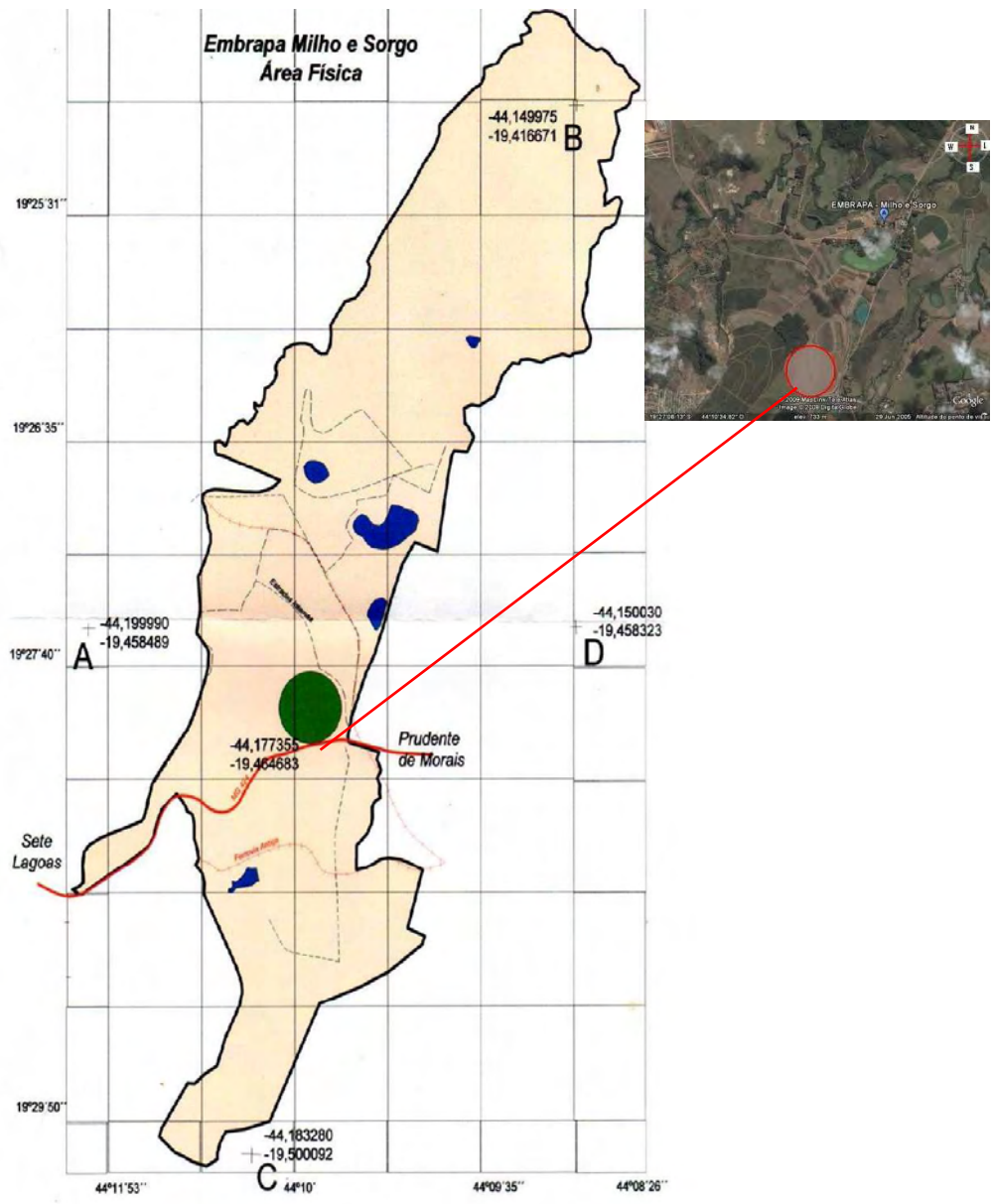


Figura 16 - Imagem da localização do pivot 3, na área pertencente à Embrapa Milho e Sorgo (área experimental em destaque), Sete Lagoas, MG.

3.3. A obtenção dos dados

3.3.1. Instrumentação micrometeorológica

Os instrumentos para medição das variáveis meteorológicas necessárias à caracterização do microclima na área do pivot 3 foram instalados em uma torre micrometeorológica de 4 m de altura. Os dados foram coletados continuamente e armazenados a cada 30 minutos, por meio de um *datalogger*, a partir dos sensores instalados na torre micrometeorológica modelo CR 10X Campbell Scientific.

As mensurações da Radiação Solar Global ($W.m^{-2}$) foram feitas com o Piranômetro SP-LITE, produzido pela Kipp & Zonen; para as mensurações da Radiação Fotossinteticamente Ativa – PAR ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$), foi utilizado o detector fotovoltaico de silício LI-190 sensor *quantum* Sb; as mensurações do saldo de radiação solar ($W.m^{-2}$) foram realizadas pelo saldo-radiômetro de termopares – Net Radiometer Q-7.1; para a mensuração da temperatura e umidade relativa do ar, foi usado o termo-higrômetro modelo HMP45C; para a mensuração da temperatura do solo, foi utilizada a sonda HFT3 *Soil Heat Flux*; a direção e velocidade do vento foram mensuradas, por meio do anemômetro 03001-*Wind Sentry*; e a precipitação pluvial foi mensurada por meio do pluviógrafo CS 700-L.

Na Tabela 3, estão listadas as variáveis medidas com os respectivos sensores utilizados. Também encontram-se os instrumentos para as medições de CO_2 e fluxo de energia, que foram possíveis por causa do sistema Edisol, instalado, também, na torre micrometeorológica, aproximadamente um mês antes do início do plantio, tempo esse necessário para ajustes e calibração de todos os sensores.

Tabela 3 - Variáveis avaliadas no experimento, instrumentação utilizada com as respectivas alturas de instalação

Variáveis medidas	Instrumento utilizado	Altura de instalação
Temperatura do ar (°C)	Temperature HMP45C	4, 2 e 0,5 m
Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Wind Sentry mod. 03001	4 m
Saldo de radiação (W.m ⁻²)	Net Radiometer Q-7.1	4 m
Radiação solar global	SP-LITE Kipp & Zonen	4 m
Umidade relativa do ar (%)	Relative humidity HMP 45C	4, 2 e 0,5 m
PAR (μmolm ⁻² .s ⁻¹)	LI-190 sensor quantum Sb	4 m
Direção do vento (°)	Wind Sentry mod. 03001	4 m
Precipitação pluvial (mm)	CSI Model CS700- L	4 m
Umidade do solo (m ³ .m ⁻³)	CS 616 – L	0,30 m (profundidade)
Fluxo CO ₂ e H ₂ O	Sistema Edisol	4 m
Fluxo de calor no solo (W.m ⁻²)	HFT3 Soil Heat Flux	2, 5, 10, 15, 30 cm (profundidades)
Temperatura do solo (°C)	Temperature Probe model 108	2, 5, 10, 15, 30 cm (profundidades)

3.3.2. Medições de fluxos de massa e de energia

3.3.2.1. Método aerodinâmico ou método do gradiente de fluxo

Pode ser dado pela equação 2.

$$F = k \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (2)$$

em que F é o fluxo de um constituinte que se difunde por meio de uma unidade de área e unidade de tempo; k , o coeficiente de difusividade turbulenta (m².s⁻¹); e $\frac{\partial \bar{c}}{\partial z}$, o gradiente de concentração do constituinte “c”.

Atualmente, a teoria aerodinâmica tem sido utilizada para representar o transporte de *momentum* (τ), calor sensível (H), calor latente (LE) e fluxo de CO₂ (Fc), como:

$$\tau = \rho_a k_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (3)$$

$$H = \rho_a c_p k_n \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (4)$$

$$LE = \rho_a \frac{c}{p} L k_v \frac{\partial e}{\partial z} \quad (5)$$

$$Fc = k_c \frac{\partial \rho_c}{\partial z} \quad (6)$$

em que ρ_a é a densidade do ar; c_p , o calor específico à pressão constante; p , a pressão constante; L , o calor latente de vaporização; e k_m , k_n , k_v , k_c são os coeficientes de difusividade turbulenta para *momentum*, calor, vapor d'água e CO_2 , respectivamente.

3.3.2.2. Método do balanço de energia – razão de Bowen

Esse método tem sido um dos mais usados na determinação de fluxos evaporativos, em vários tipos de superfícies utilizadas. Recentemente, esse método também vem sendo aplicado ao fluxo de CO_2 . A razão de Bowen foi introduzida por Bowen (1960) e consiste na relação entre os fluxos de calor sensível e calor latente, conforme a equação 7.

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\ell_{cp} \kappa_h \frac{\partial T_a}{\partial z}}{(L \ell \sum / p) \kappa_v} \frac{\partial e}{\partial z} \quad (7)$$

em que c_p é o calor específico do ar; e , a pressão de vapor; Σ , a razão entre os pesos moleculares de ar seco e ar úmido; κ_h , o coeficiente de difusividade turbulenta para calor; κ_v , o coeficiente de difusividade turbulenta para vapor; L , o calor latente de vaporização; p , a pressão atmosférica; ℓ , a densidade do ar; T_a , a temperatura do ar; e z , a altura.

Substituindo a equação 7 na equação do balanço de energia (8), obtém-se a equação 9.

$$Rn + G + H + LE = 0 \quad (8)$$

$$LE = \frac{(Rn - G)}{1 + \beta} = - \frac{Rn + G}{1 + \left(\frac{cp \, kn \frac{\partial Ta}{\partial z}}{\frac{L}{p} kv \frac{\partial e}{\partial z}} \right)} \quad (9)$$

em que cp é o calor específico do ar; Rn , o saldo de radiação; G , o fluxo de calor no solo; LE , o fluxo de calor latente; κ_h , o coeficiente de difusividade turbulenta para calor; κ_v , o coeficiente de difusividade turbulenta para vapor; L , o calor latente de vaporização; p , a pressão atmosférica; e β , a razão de Bowen.

3.3.2.3. Medições dos fluxos de CO₂ (*Eddy Covariance*)

O método de covariância dos vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*) é atualmente o preferido pela maioria dos pesquisadores para quantificação dos fluxos entre uma vegetação e a atmosfera. O fluxo é descrito pela equação 10:

$$F = \bar{\ell}_a \cdot \overline{w'c'} \quad (10)$$

em que F é o fluxo instantâneo de CO₂; $\bar{\ell}_a$, a densidade média do ar em determinado intervalo de tempo; $\overline{w'}$, o termo da flutuação da componente vertical de velocidade do vento; e $\overline{c'}$, o termo de flutuação da razão de mistura de CO₂.

De acordo com o princípio de funcionamento, cada par de transdutores usados para medir a velocidade do vento emite pulsos alternados de ultrassom de alta frequência, em que o tempo de percurso é determinado por t_1 e t_2 , entre cada transdutor em direção contrária, conhecendo a distância (L) entre os transdutores, o vetor velocidade (V), ao longo da linha entre os transdutores, pode ser derivado pela seguinte equação:

$$V = 0.5.L\left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right) \quad (11)$$

De acordo com a magnitude da velocidade do vento “*u*”, “*v*”, “*w*” e “*c*”, o anemômetro emite sinais de saída que variam de -2,5 a 2,5V. As informações desses sinais instantaneamente são armazenadas, concomitantemente com os dados de concentração do CO₂ e da H₂O em arquivos no formato SLT (*Salt Script Application*). Em seguida, levando em consideração os dados complementares, como altura da planta a cada estágio fenológico, altura da torre e área de influência da vegetação (*fetch*), os dados armazenados são processados a cada 30 minutos, intervalo de tempo necessário para que sensores captem o movimento turbulento ocorrido no ambiente, e interpretados, no computador, pelo *software Eddymeas*.

3.3.3. Método de covariância dos vórtices turbulentos

Os valores positivos de covariância indicam uma transferência de CO₂ para a atmosfera, enquanto os negativos indicam assimilação de CO₂ pela cultura.

A turbulência cria vórtices na atmosfera que se movem constantemente e que são os principais responsáveis pelo transporte das propriedades do volume de ar. Todas as propriedades atmosféricas mostram períodos curtos de flutuações em torno do seu valor médio, em longo termo. Pode-se assim decompor qualquer propriedade pela soma algébrica entre o seu valor médio no tempo e a sua flutuação ou desvio instantâneo da média (equação 12).

$$x = \bar{x} + x' \quad (12)$$

As propriedades utilizadas, transportadas num vórtice são: as três componentes da velocidade do vento (*u*, *v* e *w*), a velocidade do som e as concentrações de dióxido de carbono e vapor de água que o vórtice possui (SILVA, 2001).

O fluxo vertical médio de uma propriedade *s* é dado por:

$$S = \overline{(\bar{w} + w') \cdot (\bar{s} + s')} \quad (13)$$

Expandindo-se a equação 13:

$$S = \overline{\bar{w} \cdot \bar{s}} + \overline{\bar{w} s'} + \overline{w' \bar{s}} + \overline{w' s'} \quad (14)$$

Os termos que contenham apenas uma flutuação podem ser eliminados, pois, por definição, a média de todas as suas flutuações é nula. Pode-se ainda desprezar o termo que envolve a velocidade média vertical, pois em terreno uniforme e após a aplicação de rotação de dois eixos, referida posteriormente, a média da componente vertical da velocidade do vento é nula. O fluxo vertical de uma propriedade na camada limite turbulenta traduz-se pelo produto da sua viscosidade turbulenta pelo seu gradiente vertical, isto é, a sua habilidade para transferir essa propriedade, convertida nas unidades convenientes de fluxo.

$$S = s \cdot w \quad (15)$$

Os fluxos de CO₂ e o vapor de água são então deduzidos diretamente das covariâncias de rotação de dois eixos como:

$$F_S = \overline{w' s'} \quad (16)$$

Os fluxos de calor sensível e latente foram calculados com recurso às seguintes expressões:

$$H = \rho_m \cdot C_m \cdot \overline{w T'_a} \quad (17)$$

$$\lambda E = \lambda \cdot M_w F_w \quad (18)$$

em que H é o fluxo de calor sensível; ρ_m e C_m , a massa específica e o calor específico da mistura de ar; λE , o fluxo de calor latente; M_w , a massa molar da água; e λ , o calor de vaporização da água.

Inúmeros trabalhos no âmbito de investigação de fluxos turbulentos têm como base um trabalho pioneiro de Moncrieff (1997), em que esse autor descreve as equações para a determinação do método de covariância de vórtices turbulento. O fluxo de uma grandeza escalar “c” pode ser descrito da seguinte forma:

$$Fc = \overline{w \cdot \rho_c} \quad (19)$$

em que Fc é a densidade do fluxo escalar “c”; w , o componente da velocidade vertical do vento; e ρ_c , a densidade (concentração) do escalar “c”.

A barra sobre o produto $w \cdot \rho_c$ representa a média do produto sobre o intervalo de amostragem.

Registros de velocidade do vento, temperatura e concentração apresentam formas irregulares ou turbulentas; é conveniente, portanto, considerar a soma das partes médias e das flutuações, em que esse processo é conhecido como decomposição de Reynolds. Fazendo uma descrição para a velocidade do vento e concentração, têm-se:

$$w = \overline{w} + w' \quad (20)$$

$$\rho_c = \overline{\rho_c} + \rho'_c \quad (21)$$

Reescrevendo a equação (21):

$$F_c = \overline{w \rho_c} + \overline{w' \rho'_c} \quad (22)$$

Uma hipótese normalmente feita é que sobre certo intervalo de tempo não há nenhum movimento regular de massa de ar na vertical; isto é, $\overline{w} = 0$. Com base nessa hipótese, foi obtido da equação (22) a equação para a covariância de vórtices turbulentos.

$$F_c = \overline{w' \rho'_c} + \text{termos de correção} \quad (23)$$

Assim, os cálculos dos fluxos passam a seguir, por correções, a estacionalidade e a rotação dos eixos.

O método de correlação turbulenta (*Eddy Correlation*) determina o fluxo vertical de um escalar por meio de um plano horizontal, uma unidade de área e durante determinado período de tempo, através da quantificação experimental do termo de covariância entre a componente vertical da velocidade do vento, w , e a quantidade escalar S (BALDOCCHI et al., 1998 e VERMA, 1990, citados por Feliciano, 2001).

$$F_c = \overline{w's'} = \overline{ws} - \overline{w}\overline{s} \quad (24)$$

A determinação do termo de covariância $\overline{w's'}$ requer registros simultâneos, rigorosos e suficientemente longos de $w(t)$ e $s(t)$, de tal modo que a média temporal convirja em termos estatísticos, para a média de um conjunto de pontos.

A equação (23) tem sido aplicada com sucesso em medições de fluxo de quantidade de movimento, τ , calor sensível, H , vapor de água e alguns poluentes atmosféricos, F .

A técnica de correlação de vórtices turbulentos, utilizada para o cálculo de fluxos de calor sensível H , baseia-se na covariância da velocidade vertical do vento e da umidade absoluta.

$$\tau = \rho_a \overline{w'u'} \quad (25)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T'} \quad (26)$$

$$F_{H_2O} = \lambda \overline{w'q'} \quad (27)$$

$$F = \overline{w'c'} \quad (28)$$

em que λ é a velocidade longitudinal do vento a dada temperatura e umidade absoluta; c , a concentração de poluentes à mesma temperatura e umidade absoluta considerada; ρ_a , a densidade absoluta do ar; e C_p , a capacidade específica do ar à pressão constante.

Em 2004, Tunnus descreveu uma aplicação feita por Reichl (1979), para a aplicação do fluxo de calor sensível (H_s), especialmente para altas condições de umidade do ar, como é apresentada pela equação a seguir:

$$H_s = \bar{\rho} c p \overline{w'T'} \quad (29)$$

em que $\bar{\rho}$ é a densidade do ar; e $\overline{w'T'}$, a covariância entre o vento vertical (w) e a temperatura (T).

Visto que:

$$\frac{cv}{cpd} = 1,83 \quad (30)$$

$$cpT = cpd(1 + 0,83q) \quad (31)$$

Sendo assim, o fluxo de calor sensível passar a ser:

$$H_s = \bar{\rho} cpd(\overline{w'T} + 0,83\overline{w'q'T}) \quad (32)$$

O método de vórtices turbulentos (EC – *Eddy Covariance*), descrito por Rizzo (2006), consiste em definir como o fluxo vertical (F) de um componente atmosférico é dado pela covariância entre as séries temporais da velocidade vertical do vento (w) e da concentração do componente (c).

$$\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (w_i - \bar{w})(c_i - \bar{c}) = \frac{1}{N} \sum w'c' = \overline{w'c'} \quad (33)$$

em que w_i denota a velocidade instantânea do vento; \bar{w} , a velocidade média num período de 10 a 60 minutos; e w' , a parte turbulenta da velocidade do vento. A velocidade de deposição do constituinte c é então definida como:

$$V_{dep} = -\frac{\phi_c}{c} \quad (34)$$

Por convenção, a velocidade de deposição positiva indica o movimento descendente. O fluxo vertical de momento horizontal é proporcional à covariância entre a velocidade horizontal e a velocidade vertical do vento:

$$\tau = -\rho \sqrt{\overline{w'u'^2} + \overline{w'v'^2}} = -\rho u^{*2} \quad (35)$$

em que ρ representa a densidade do ar; e u^* , a velocidade de atrito. Por sua vez, o fluxo de calor sensível é definido a partir da covariância entre a velocidade vertical do vento e a temperatura potencial (θ):

$$\theta = \rho c_p \overline{w'\theta'} \quad (36)$$

em que c_p é o calor específico do ar a pressão constante. Como pressuposto teórico, o método, considerando a homogeneidade horizontal e estacionaridade, assevera a ausência de advecção horizontal e a estacionaridade nas medidas dos constituintes atmosféricos.

Foi enfatizado por Rizzo (2006) que a turbulência é um fenômeno intrinsecamente não linear e só pode ser analisado por meio de ferramentas estatísticas; assim como os processos turbulentos são associados a variações com períodos de ordem de minutos ou segundos e a intensidade da turbulência está relacionada à amplitude da variação do vento em torno da média. Feliciano (2001) complementou que a técnica da correlação turbulenta requer instrumentos com uma resposta suficientemente rápida, de modo a garantir a medição de toda a gama espectral de turbilhões envolvidos no transporte vertical do constituinte atmosférico.

3.3.3.1. Variância

A variância é uma medida estatística da dispersão de um conjunto de pontos em torno da média. A variância da série temporal de uma variável A pode ser calculada por meio da seguinte expressão:

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (A_k - \bar{A})^2 \quad (37)$$

em que A_k representa a medida instantânea; e \bar{A} , a média. Retomando a equação que separa a parte turbulenta da parte média pela regra de Reynolds, tem-se:

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (a_k)^2 = \overline{a'^2} \quad (38)$$

O cálculo de variâncias está associado a medidas de intensidade de turbulência ou de energia cinética turbulenta.

3.3.3.2. Covariância e correlação

A covariância entre duas séries temporais A e B indica o grau de variação comum entre as duas variáveis e pode ser definida como:

$$\text{cov}(A, B) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (A_k - \bar{A})(B_k - \bar{B}) \quad (39)$$

Substituindo mais uma vez a equação 38 (média de Reynolds), tem-se:

$$\text{cov}(A, B) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k' b_k' = \overline{a' b'} \quad (40)$$

Se A e B variarem juntas no mesmo sentido, isto é, se um aumento em A corresponder a um aumento em B , a média do produto entre (a_k' e b_k') será

positiva. Covariâncias são associadas a medidas de fluxos turbulentos e possuem unidades correspondentes ao produto das variáveis envolvidas.

A normalização da covariância dá origem a um coeficiente que indica o grau de linearidade da relação entre duas variáveis, denominado coeficiente de correlação:

$$\text{cov}(A, B) = \frac{\overline{a'b'}}{\sigma_A \sigma_B} \quad (41)$$

Por definição, o coeficiente de correlação varia entre +1 e -1. Duas variáveis perfeitamente correlacionadas apresentam um coeficiente de correlação igual a "1". Se o coeficiente for próximo de "0", significa que a relação entre as variáveis não é linear.

3.3.4. Analisador de gás LI-6262

O sistema adotado foi composto por um analisador de gás IRGA 6262, um anemômetro sônico com frequência de 21 Hz (necessária para se obter toda e qualquer turbulência por meio dos transdutores), uma caixa (*Eddybox*) contendo um notebook, um controlador de fluxo, um fluxímetro, uma bomba grande para succionar o ar externo (fluxo médio de 6 l.min⁻¹) e uma bomba pequena, para proporcionar corrente de ar pela tubulação interna até os recipientes com os produtos químicos, atravessando-os com o objetivo de filtrar as impurezas presentes no ar atmosférico antes de chegar ao analisador de gás.

3.3.5. Processamento dos dados

O processamento dos dados de CO₂ e H₂O foi realizado pelo *software Eddyflux*, que é uma programa específico para a análise dos dados, o qual, junto com o *software Eddymeas*, voltado para a aquisição dos dados em campo, e o *Eddycorr*, que calcula o tempo de retardo da concentração de CO₂ e H₂O, por meio da tubulação, formam o pacote de programas que foram

escritos na linguagem *Visual Basic*, a fim de serem executados no sistema operacional *Windows*, pois são específicos para o cálculo dos fluxos no sistema *Eddy Correlation*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Condições microclimáticas durante o ciclo da cultura do milho

O resumo das condições microclimáticas durante o ciclo da cultura do milho é apresentado, com base nas medições feitas acima do dossel, nos estádios fenológicos V4 (4^a folha), VT (pendoamento), R3 (grão leitoso) e R6 (maturação fisiológica) das variáveis: saldo de radiação (R_n), radiação solar global (R_g), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura do ar (T_{ar}), velocidade do vento (VV), déficit de pressão de vapor (DPV), além da velocidade de fricção (U^*), temperatura do solo (T_s) e umidade do solo (U_{solo}). São enfatizadas apenas as variações diurnas, entre 9 e 16 horas, pelas possíveis associações com os fluxos diversos de CO_2 entre a cultura e a atmosfera. Esses resultados estão ilustrados nas Figuras 17, 18, 19 e 20.

Os termos radiativos R_n , R_g e RFA apresentaram grande variação durante os estádios fenológicos da cultura, principalmente em razão da nebulosidade e da distribuição de chuva ocorrida nos períodos.

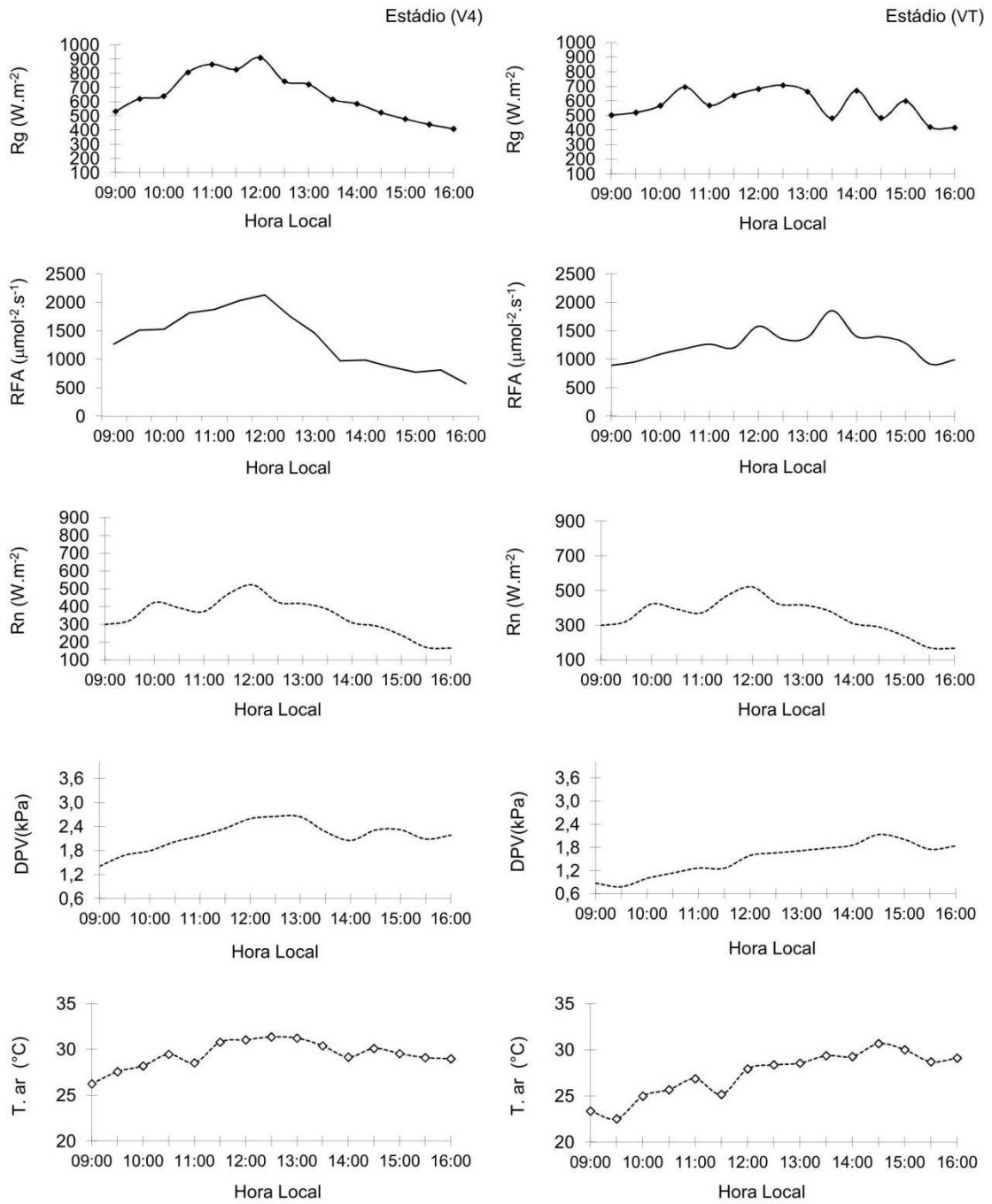


Figura 17 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos V4 e VT da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.

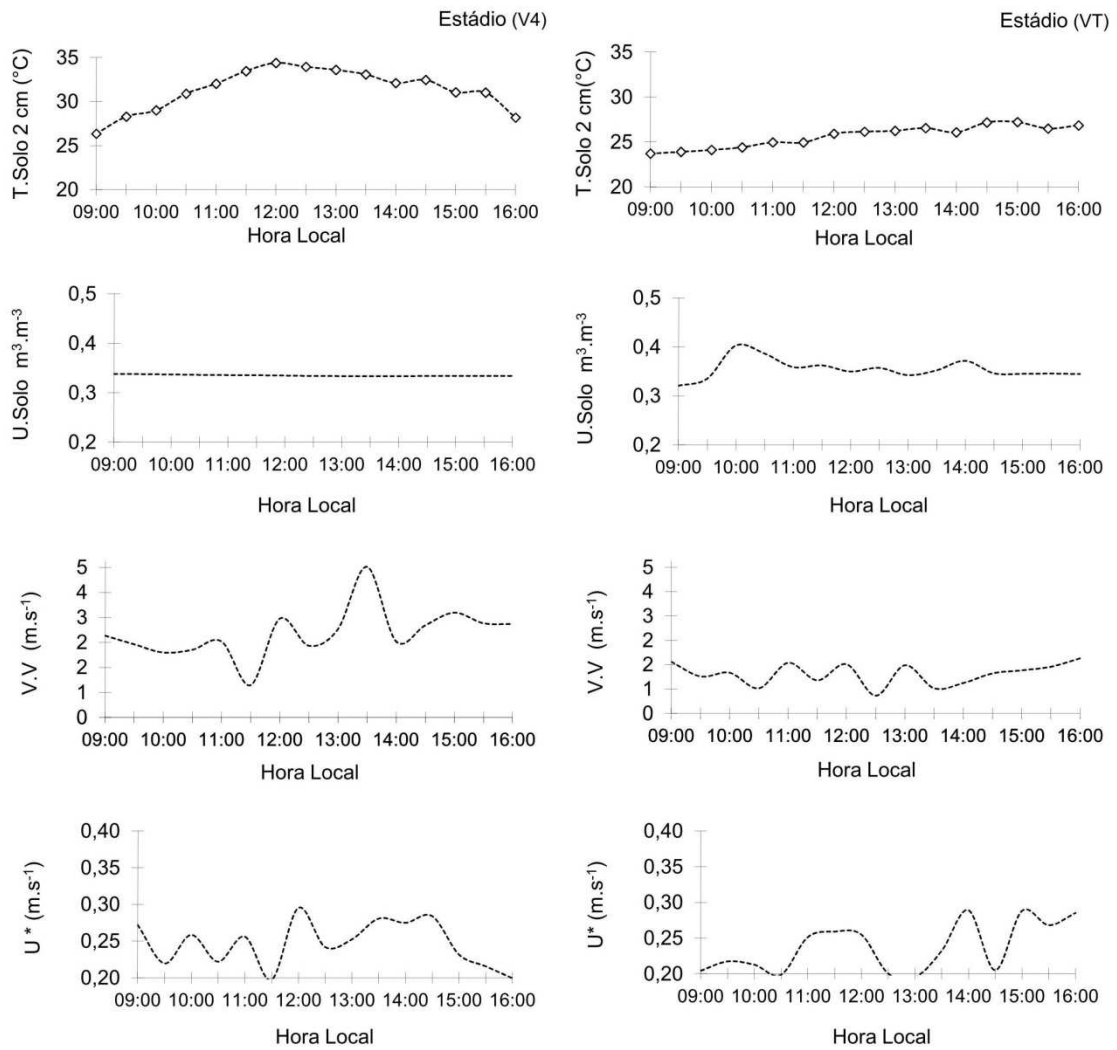


Figura 18 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos V4 e VT da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.

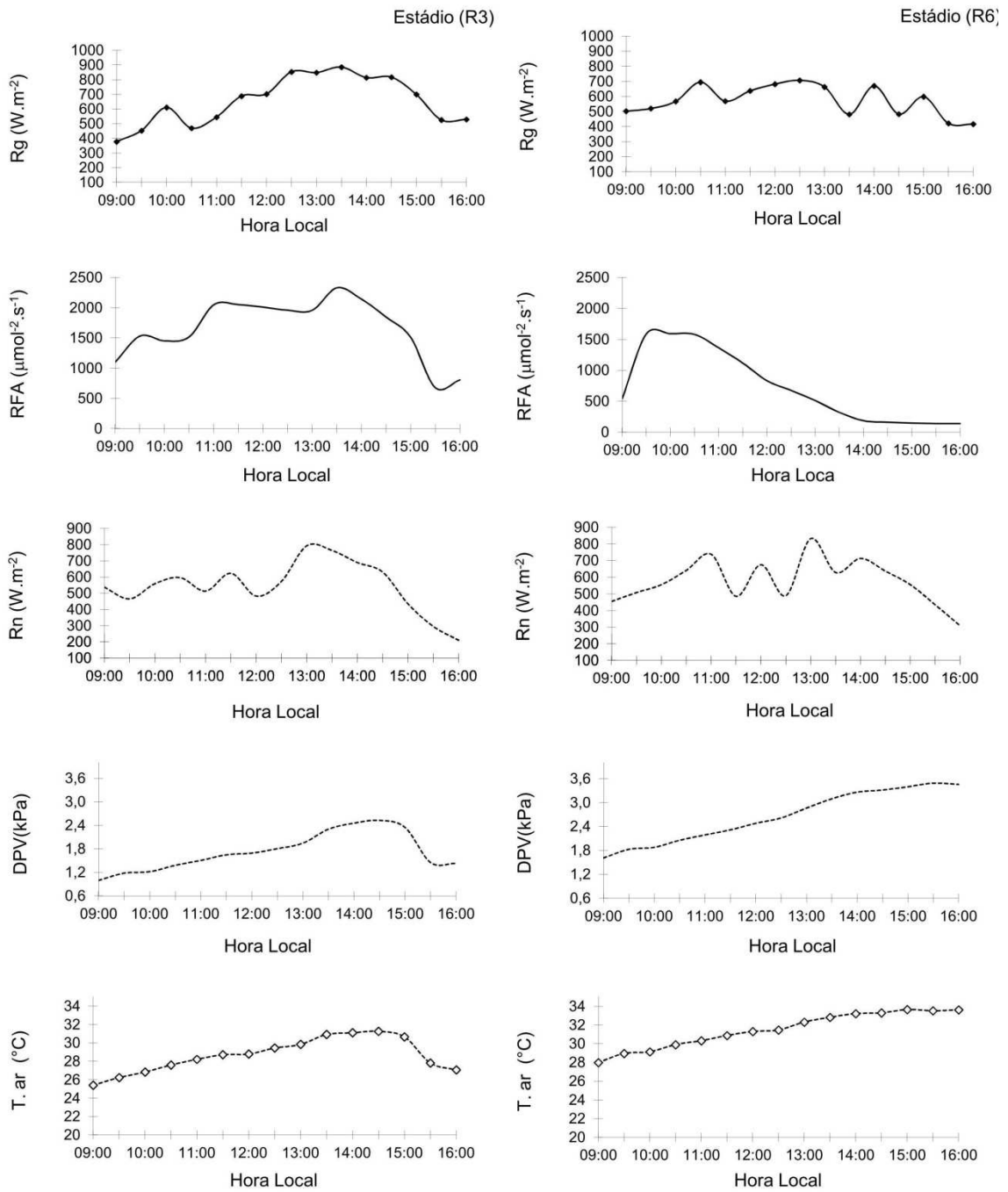


Figura 19 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos R3 e R6 da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.

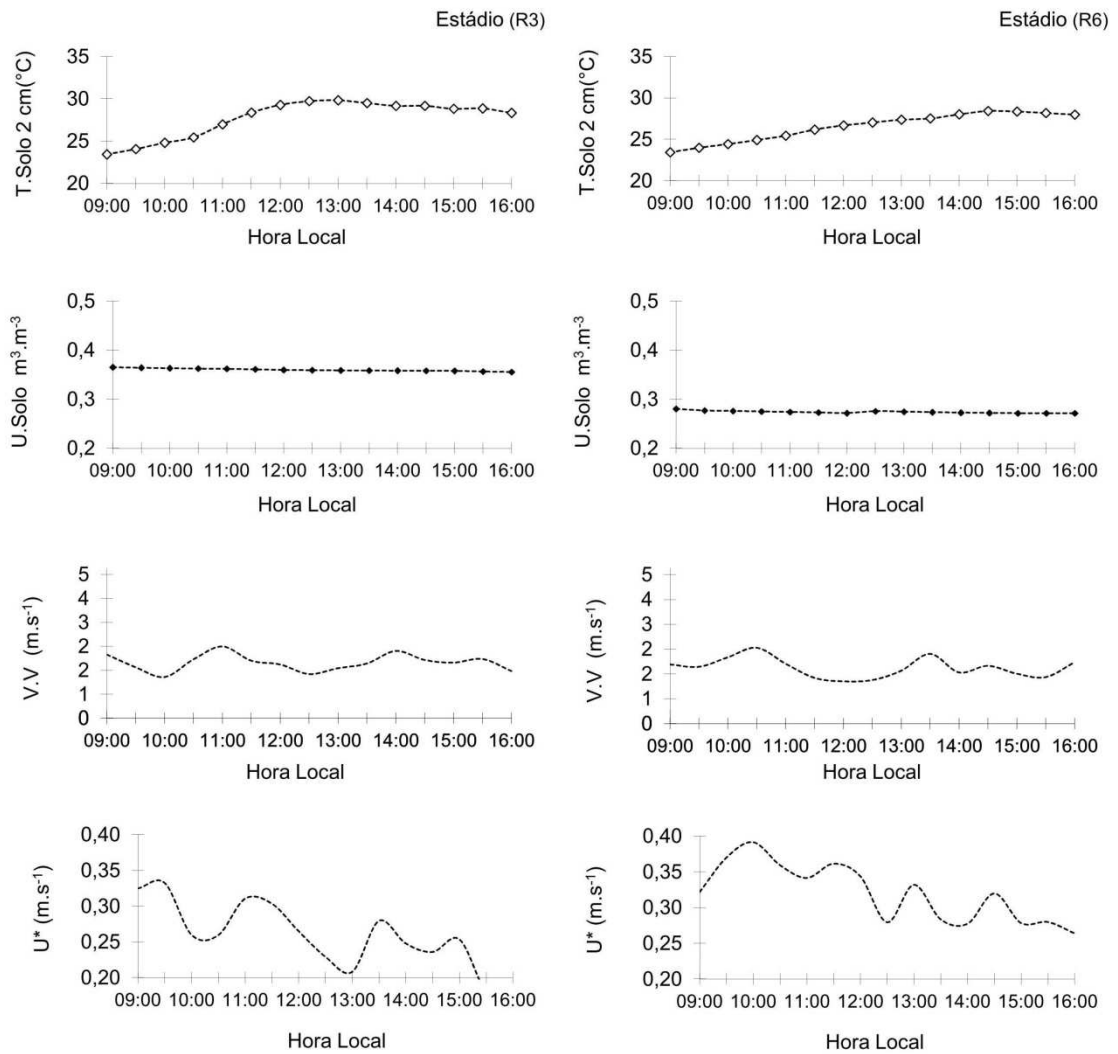


Figura 20 - Valores médios horários das variáveis monitoradas nos estádios fenológicos R3 e R6 da cultura do milho BR106, em Sete Lagoas, MG.

As variações observadas nesses termos radiativos nos diferentes estádios fenológicos determinaram a variação das outras variáveis microclimáticas, por meio do efeito direto nos processos de convecção, evaporação e fotossíntese, afetando as respostas fisiológicas relacionadas com a abertura dos estômatos. O maior contraste entre as variações microclimáticas ocorreram entre os estádios fenológicos vegetativo (VT) e a maturação fisiológica (R6). A média horária de saldo de radiação no período diurno entre o estádio VT e R6 foi de 401 a 576 W.m⁻².

No estádio (V4), a disponibilidade de energia acompanhou a marcha da temperatura do ar, coerentemente com o período, sendo a ocorrência dos valores máximos por volta das 11 e 12 horas, com redução progressiva até o final do dia.

A temperatura do solo a 2 cm de profundidade apresentou tendências de variação semelhantes às observadas para a temperatura do ar no longo dos estádios fenológicos, variando entre o mínimo de 23,4°C e no máximo de 34,4°C, nos diferentes estádios; entretanto, em conformidade ao desenvolvimento do dossel, vindo a favorecer o aumento e a diminuição na temperatura do solo, o que propicia a temperatura esperada para um bom desenvolvimento da cultura. Segundo Lal (1974), a temperatura do solo ideal para o cultivo do milho situa-se na faixa de 25 a 35°C.

As temperaturas do ar mais elevadas ocorreram no estádio de maturação fisiológica R6, com valores médios acima de 30°C, a partir de 11 horas. A temperatura média do ar no período diurno variou de 27,4°C, no estádio VT, a 31,5°C, no estádio R6. Esse aumento, possivelmente, pode está relacionado à condição da cultura em campo, a de secagem de grão. A temperatura do ar durante os estádios estiveram entre a faixa da ocorrência dos processos fisiológicos que, de acordo com Brunini et al. (2001), ocorrem numa faixa de temperatura entre 0 e 40°C.

A umidade do solo manteve-se quase constante sem grandes variações, estando entre 0,3 a 0,4 m³.m³ de água, sendo o valor máximo encontrado de 0,4 m³.m³ no estádio VT. Analisando as demais variáveis, foi identificado que tal variação não teve relação com as demais variáveis meteorológicas, mas sim com a aplicação de 12 mm de lâmina d'água, por

meio da irrigação, que aumentou o teor de água no solo no estágio considerado.

O déficit de pressão de vapor, que desempenha um papel importante nas taxas de crescimento e transpiração das plantas, também apresentou maior variação entre os estados VT e R6. Na maturação fisiológica, no R6, predominaram valores de déficit de pressão de vapor acima de 2 KPa, durante o período diurno, com valor médio de 2,65 KPa. O estágio VT apresentou condições mais úmidas, que podem estar está relacionado à irrigação, em período prolongado na área, com os valores de déficit de pressão de vapor abaixo de 2 KPa, em todas as horas do período diurno, tendo apresentado valor médio de 1,51 KPa. A efetividade das trocas turbulentas de CO₂, expressa pela velocidade de fricção, foi maior na maturação fisiológica R6, com valor médio de 0,32 m.s⁻¹, e menor no período vegetativo VT, com valor médio de 0,24. O conteúdo de umidade do solo foi maior no período vegetativo V4 e menor na maturação fisiológica.

A variação de duração de brilho solar durante os estádios fenológicos, que expressa a variação de nebulosidade durante o período experimental, está ilustrada na Figura 21. Observando o total de brilho solar, constatou-se que a variação foi constante e maior e no período vegetativo da cultura.

A distribuição mensal de precipitação durante o período experimental é apresentada na Figura 22. O maior valor de precipitação ocorreu no mês de dezembro, com 454,2 mm, e, o menor, registrado no período do experimento, foi em fevereiro com 12,4 mm.

Na Figura 23, pode ser observada a distribuição de frequência da direção do vento, fundamental para assegurar se as condições de *fetch* da área experimental são adequadas. A direção norte foi a predominante do vento, seguida da sudeste. Cabe destacar que nas proximidades da área experimental, na parte leste, havia um pequeno complexo industrial com fábrica de cimento e autoforno, emitindo resíduos poluentes continuamente na atmosfera. Assim, para a análise dos fluxos de CO₂, na área em estudo, o conhecimento da predominância do vento foi fundamental para as análises das coletas do CO₂ e conseqüentemente para a filtragem dos dados.

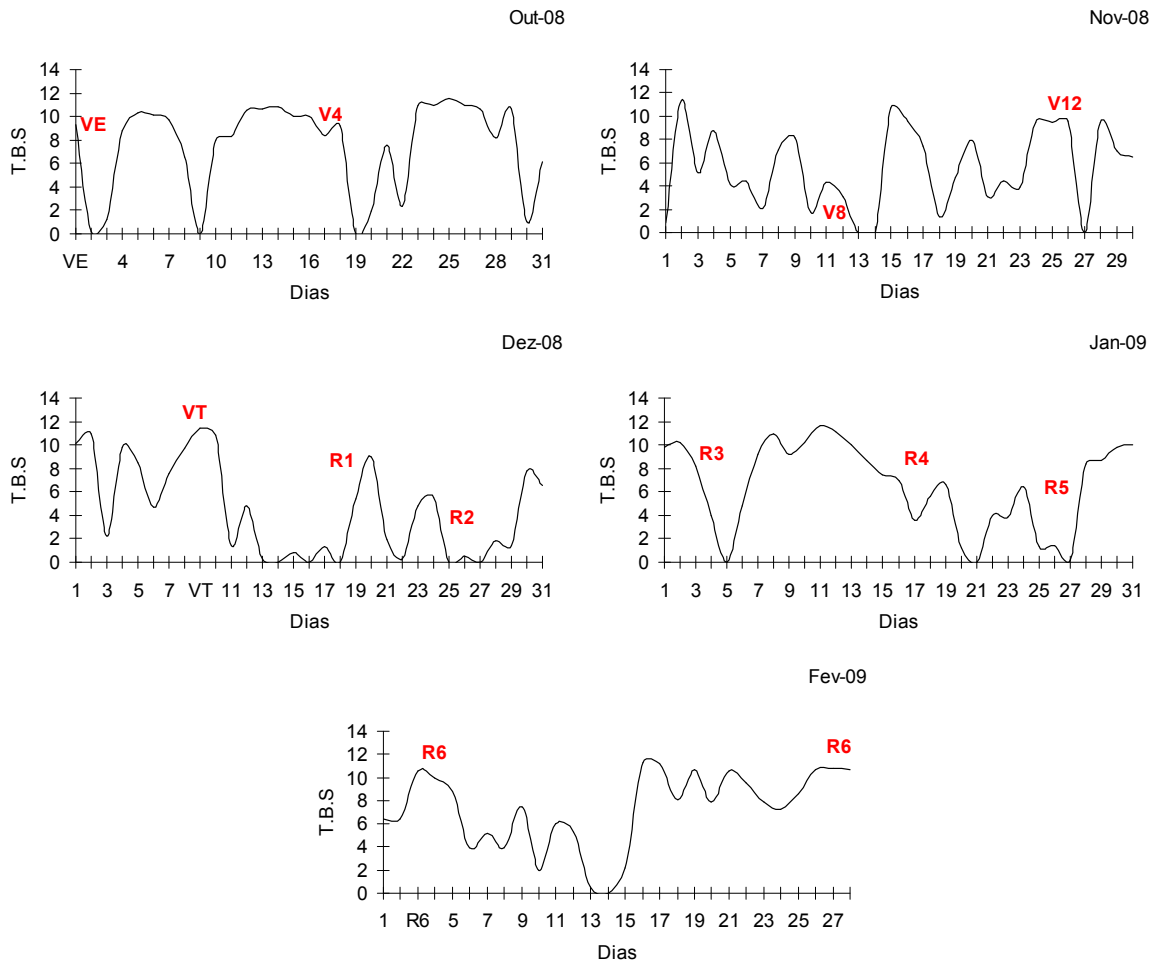


Figura 21 - Variação das horas de brilho solar, durante os estádios fenológicos da cultura de milho.

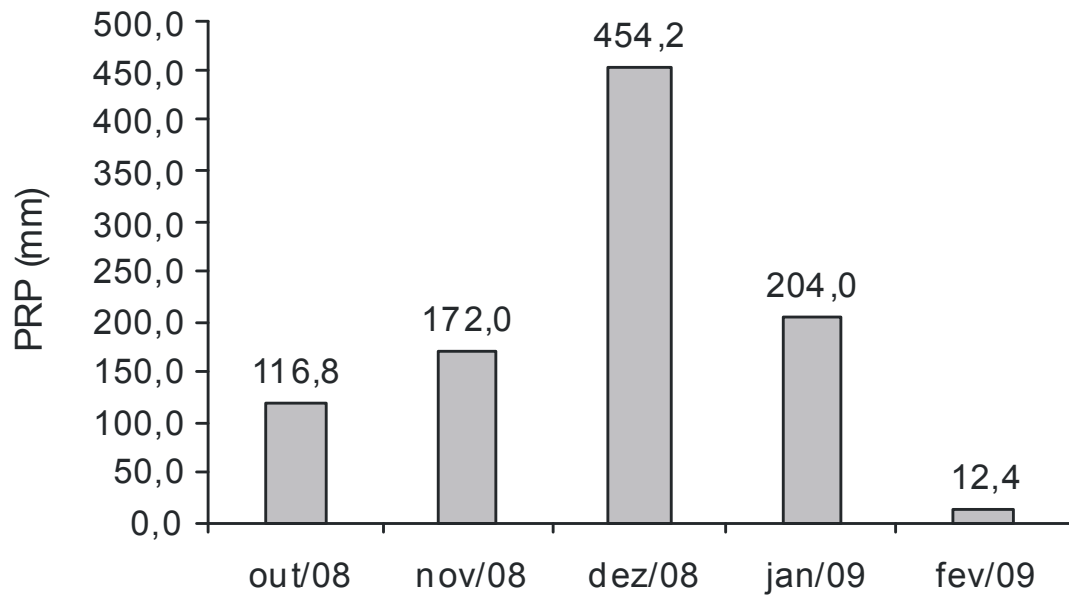


Figura 22 - Distribuição da precipitação (PRP), durante o período experimental.

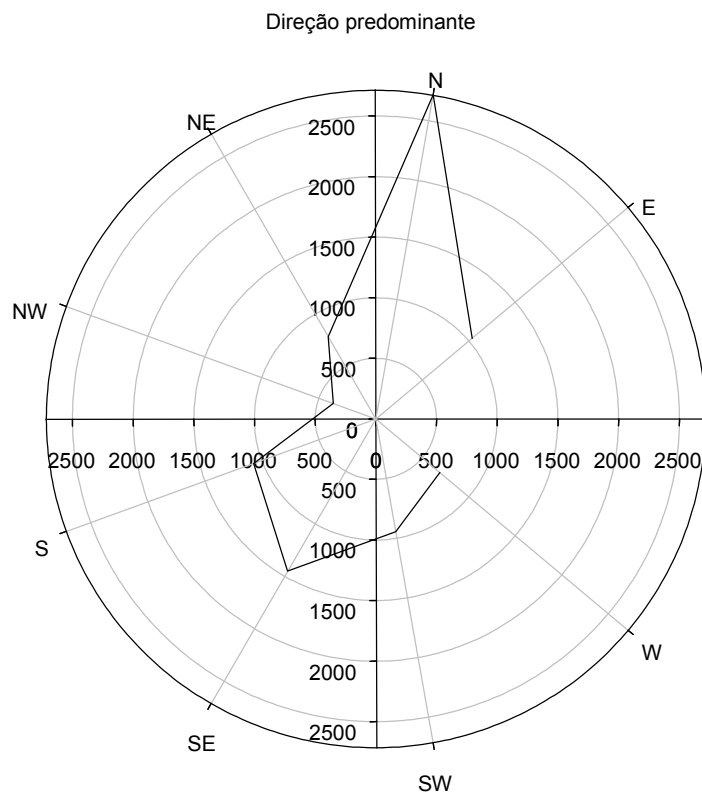


Figura 23 - Número de eventos da direção predominante do vento na área experimental.

A velocidade de fricção (U^*) é o indicativo de turbulências; todavia, essa turbulência é analisada por meio da técnica de correlação turbulenta, que, algumas vezes, subestima a transferência noturna de dióxido de carbono em condições de estratificação da atmosfera (HOLLINGER et al., 1999; ANTHONI et al., 2004; SCOTT et al., 2004; WOHLFAHRT et al., 2005).

A partir de certo nível de turbulência atmosférica, há, normalmente, determinada mistura que permite o transporte eficiente do CO_2 . Entretanto, pode haver, dependendo das condições reinantes da superfície e o ponto de medição, reduzido ou inexistente armazenamento de CO_2 . Nas Figuras 24 e 25 estão representadas a distribuição da velocidade de fricção (U^*) nos períodos diurnos e noturnos, respectivamente, após a filtragem nos dados brutos, em que são retirados os valores abaixo de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Observou-se que os valores variaram entre $0,2$ e $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ em ambos os períodos; no entanto, no período diurno, em que há maior turbulência, foram registrados os valores de até $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ e, no período noturno, não houve ocorrência de valores acima de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$.

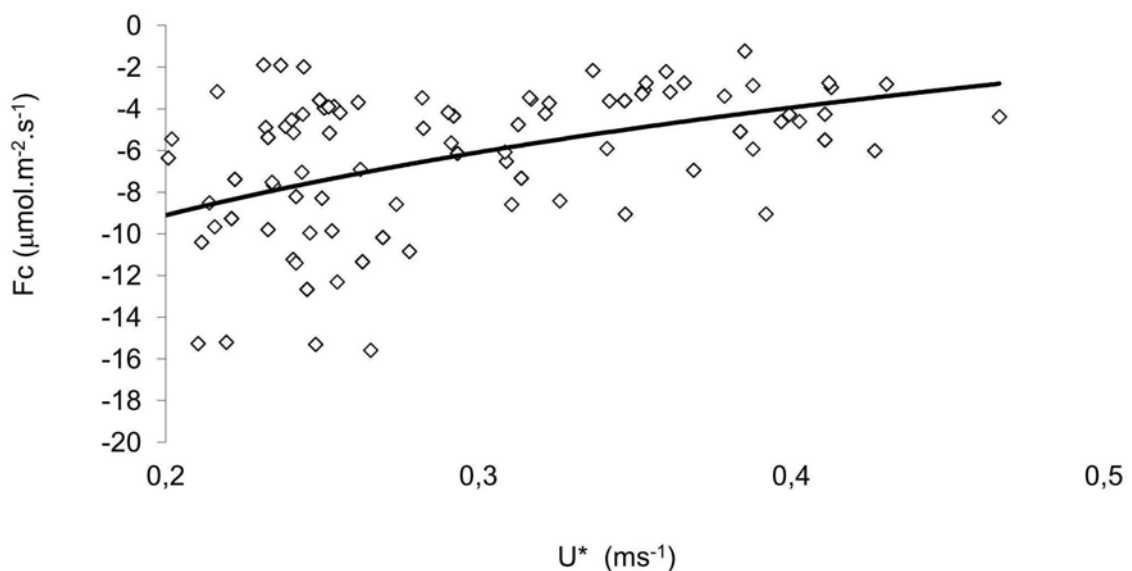


Figura 24 - Variação da velocidade de fricção U^* , ao longo do experimento no período diurno, sobre a cultura do milho BR106.

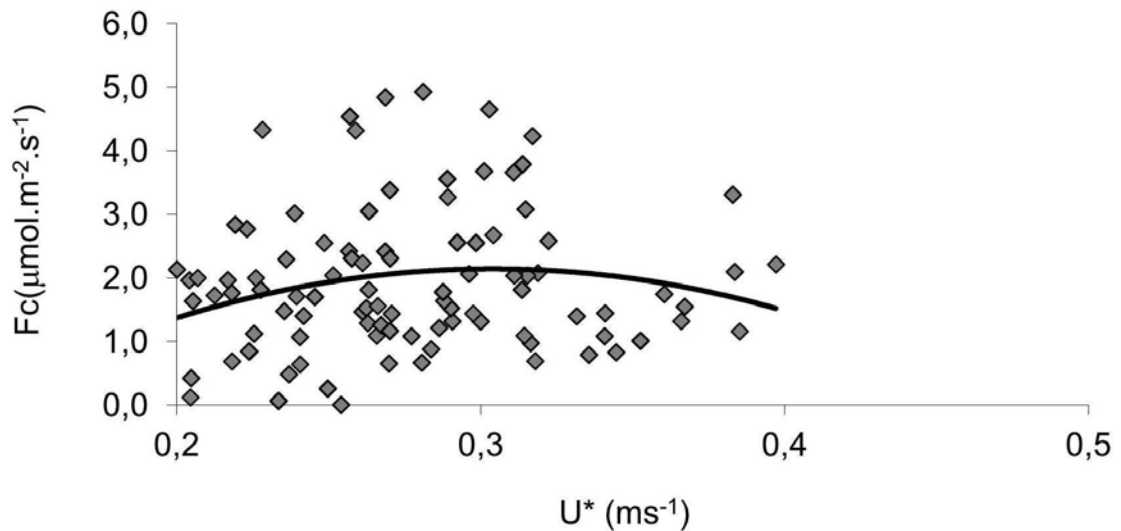


Figura 25 - Variação da velocidade de fricção U^* , ao longo do experimento no período noturno, sobre a cultura do milho BR106.

4.2. Variações horárias, diárias e sazonais da concentração de CO_2 acima da cultura de milho no longo de seu ciclo

Na Figura 26, podem ser observadas, no longo de todo o experimento, as variações médias, a cada 30 minutos, da concentração de CO_2 , a 4 m de altura. Grandes variações são observadas em consequência das trocas de CO_2 entre a cultura de milho e a atmosfera, decorrentes dos processos de fotossíntese e respiração. As menores concentrações de CO_2 ocorreram durante o período diurno, por causa da fotossíntese, enquanto as maiores concentrações, que expressam as contribuições da respiração da cultura e do solo, foram observadas durante o período noturno.

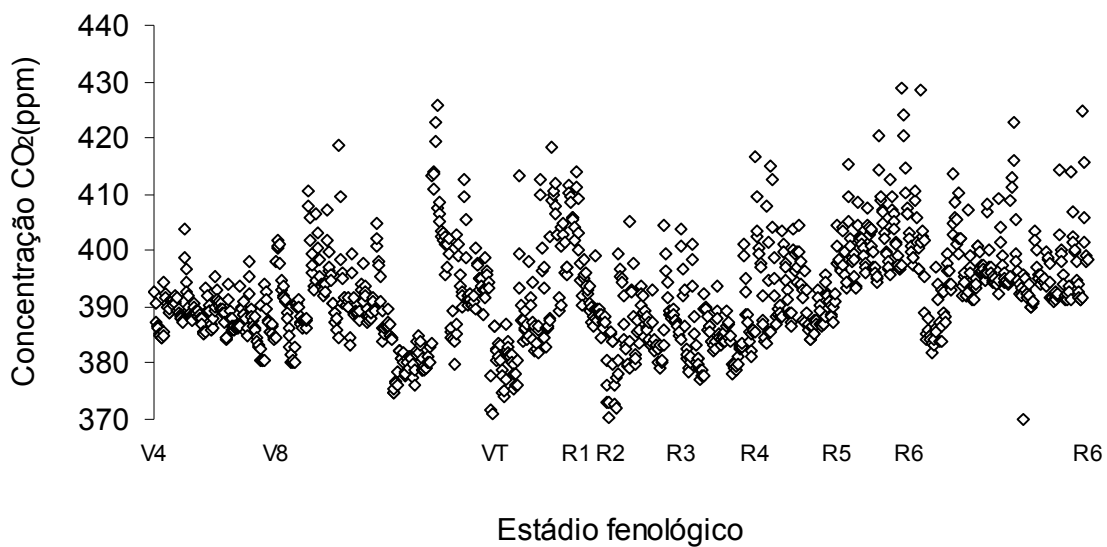


Figura 26 - Variação da concentração de CO₂, a cada 30 minutos, no longo do experimento conduzido entre outubro de 2008 e março de 2009.

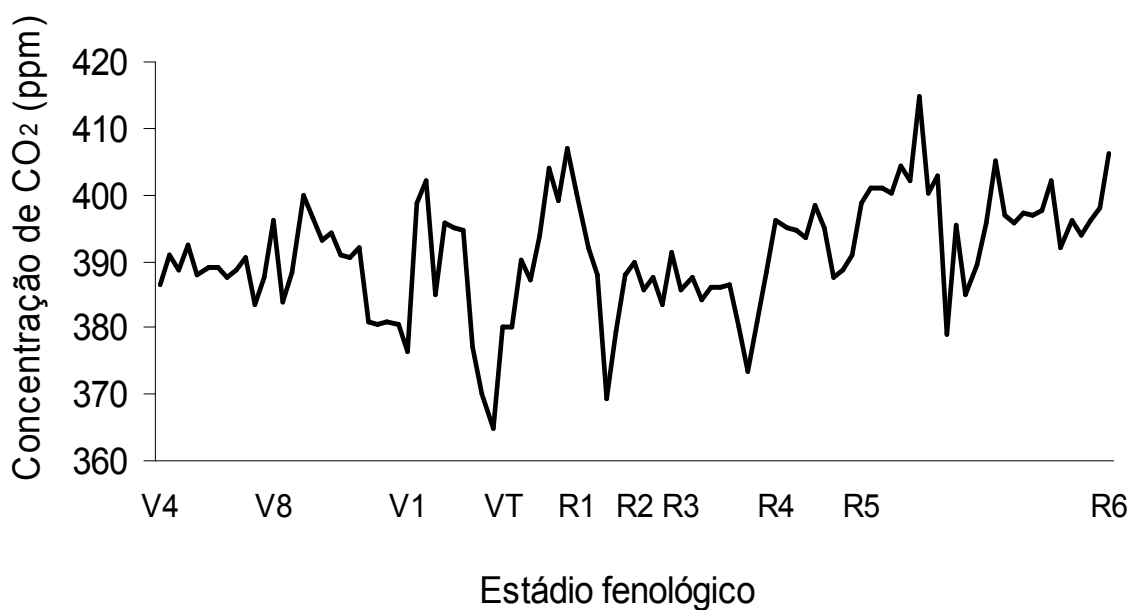


Figura 27 - Valores médios diários das concentrações de CO₂, no período diurno, durante os meses outubro de 2008 a março de 2009.

As variações noturnas das concentrações de CO₂ estão apresentadas na Figura 28. As concentrações noturnas de CO₂, durante o experimento, variaram de 394 a 454 ppm, com valor médio de 415 ppm. Destaca-se a ocorrência de alguns picos noturnos de CO₂ com valores em torno de 450 ppm. Valores próximos de 500 ppm também têm sido observados por vários pesquisadores, desde os trabalhos pioneiros, como os realizados sobre culturas agrícolas por Verma e Rosenberg (1976), em que, segundo esses autores, as elevadas concentrações foram observadas em alturas próximas do topo da cultura e em condições de noites calmas. Os mesmos autores também constataram que essas concentrações foram bem atenuadas para níveis acima de 16 m, ou seja, bem mais afastado da cultura. Pesquisas mais recentes, como a realizada por Gallon et al. (2006), também registraram valores de concentração de 500 ppm em floresta, próximo ao momento do nascer do sol.

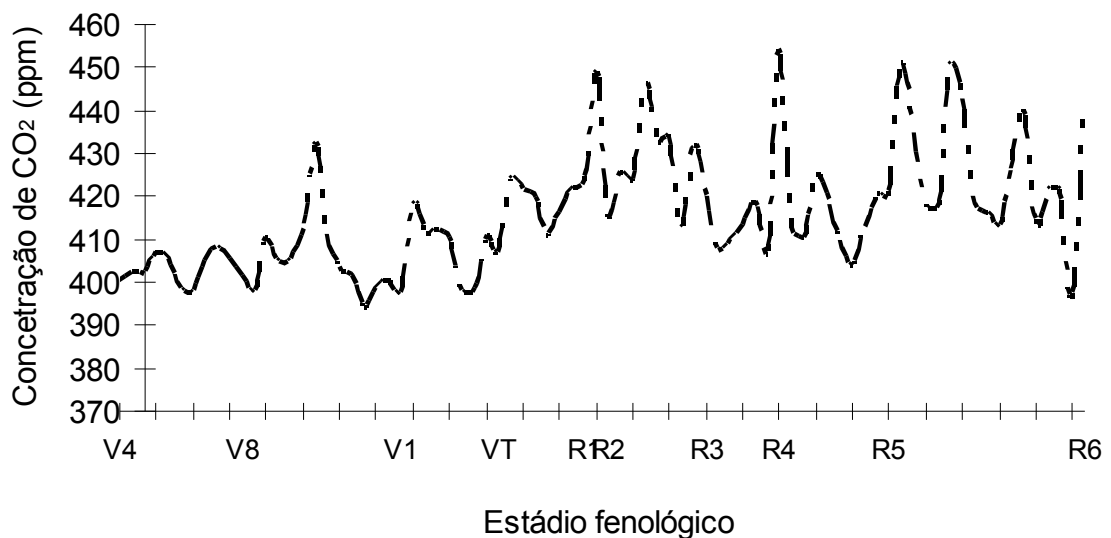


Figura 28 - Variação média da concentração de CO₂ noturno, durante os meses de outubro de 2008 a março de 2009.

Na Tabela 4, pode ser observada a variação dos valores máximos e mínimo de CO₂, bem como o número de eventos ocorridos para cada direção predominante do vento no período diurno. Os valores mínimos da concentração de CO₂ foram maiores quando o vento foi de SW, direção que ocorreu com menor frequência. Já os valores máximos da concentração de CO₂ ocorreram quando o vento foi de Leste (E), mesma direção com o maior número de ocorrência do vento e da localização da indústria de ferro-gusa, a três quilômetros da torre micrometeorológica.

Tabela 4 - Variação da concentração de CO₂ com valores máximo, mínimo e médio; direção predominante; e número de eventos do vento, na área experimental no período diurno

Direção do vento	N.º de eventos ocorridos	Concentração de CO ₂ (ppm)		
		Máxima	Mínima	Média
N	265	420,4	362,1	391,4
NE	246	424,7	360,5	391,0
E	273	428,6	360,5	387,8
SE	222	413,9	360,5	387,1
S	79	425,7	362,2	389,1
SW	43	414,5	365,7	389,3
W	57	429,0	360,0	390,5
NW	63	412,6	360,7	388,5

A predominância do vento e os valores máximos e mínimos da concentração de CO₂, no período noturno, estão descritos na Tabela 5, na qual pode ser verificado que o vento da direção norte (N) foi o que apresentou maior predominância, assim como apresentou também as maiores concentrações de CO₂, direcionando os valores máximos registrados desse gás para essa predominância. Já o menor número de ocorrência do vento foi da direção leste (E), que também apresentou o menor valor da concentração máxima.

Tabela 5 - Variação da concentração máxima e mínima de CO₂, direção predominante e número de eventos do vento, na área experimental no período noturno

Vento	N.º de eventos ocorridos	Concentração CO ₂ (ppm)	
		Máxima	Mínima
N	1361	535,3	367,1
NE	122	482,2	364,8
E	106	468,9	352,0
SE	356	501,3	378,7
S	353	482,5	378,6
SW	330	494,4	399,0
W	344	498,9	395,8
NW	109	498,6	360,0

Embora durante todo o ciclo do milho tenha sido registrado o funcionamento noturno (após as 22 horas) da indústria de ferro-gusa, localizada aproximadamente a três quilômetros à leste (E) da torre micrometeorológica, a emissão de gases para a atmosfera por essa indústria parece não ter influenciado a concentração de CO₂ na área experimental, durante o período noturno, por causa, principalmente, da baixa frequência de ocorrência do vento proveniente de leste.

Na Figura 29, pode ser visto a variação horária dos valores médios da concentração de CO₂, durante todo o período experimental. A queda abrupta nas concentrações de CO₂ ocorrem logo após o nascer do sol, com o início do processo de fotossíntese, estabilizando-se a partir das 10 horas até próximo de 16 horas. A partir das 18 horas, com a ausência do processo fotossintético, as concentrações de CO₂ aumentam abruptamente, expressando as contribuições respiratórias do solo, das raízes e da parte aérea das plantas. As concentrações médias de CO₂, durante todo o período experimental, variaram de 385 ppm (período diurno) a 437 ppm (período noturno), com valor médio de 410 ppm. Embora a concentração de CO₂ tenha sido pouco discutida nos trabalhos de análise de fluxos carbono, trabalhos como os de Baldocchi (1983)

já relatavam a concentração de CO₂ para a cultura da soja de até 370 ppm. Brown e Rosenberg (1970), também citado por Baldocchi (1981), chegaram a registrar valores noturnos de CO₂ de até 500 ppm para a cultura da beterraba. Outro trabalho, realizado por Júnior (2004), com pastagens na Região Amazônica, apresentou registro de valor máximo de 533 ppm e mínimo de 367 ppm de CO₂.

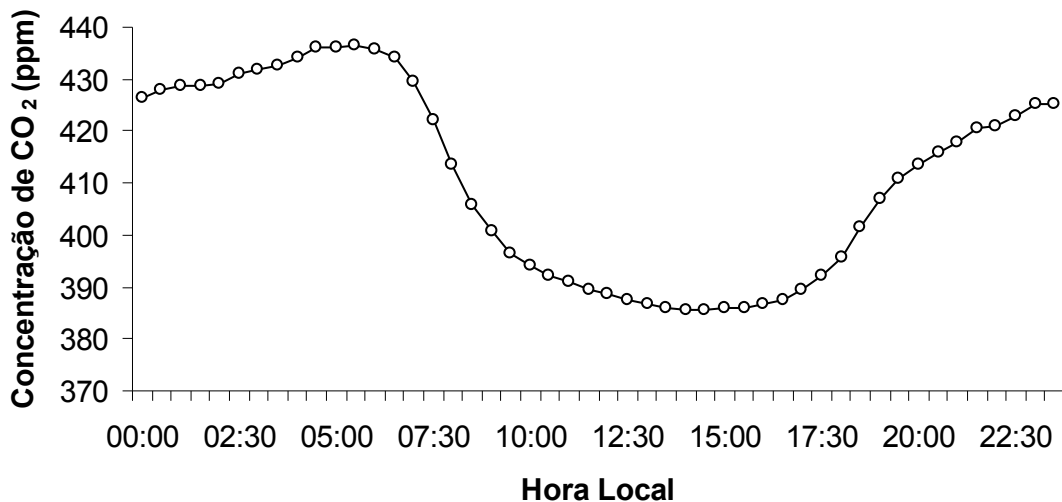


Figura 29 - Variação horária dos valores médios da concentração de CO₂, durante os meses de outubro de 2008 a março de 2009.

4.3. Fluxos de CO₂ durante o período diurno

É apresentada, na Figura 30, a variação horária dos valores médios, durante todo período diurno, dos fluxos de CO₂ entre a cultura de milho e a atmosfera. A grande variação horária dos fluxos pode ser em razão da influência das condições meteorológicas, da planta e do solo. Os valores máximos geralmente ocorreram próximo às 12 horas, sendo o valor médio do fluxo no período diurno de $-7,53 \mu\text{mol.CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e o valor máximo de $-29,3 \mu\text{mol.CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Valores próximos aos registrados foram encontrados por Steduto (1998), em plantação de milho, com fluxos de 35,0

$\mu\text{mol.CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, e, por Baldocchi (1994), que, para a cultura do milho, encontrou o valor de $34,0 \mu\text{mol.CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

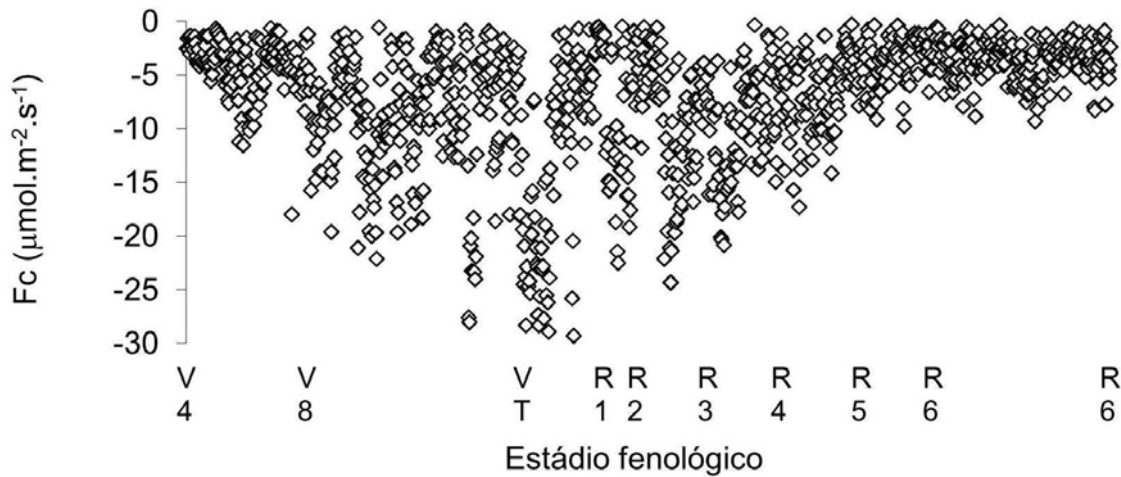


Figura 30 - Variação sazonal dos fluxos de CO₂, no longo do experimento, de outubro de 2008 a março de 2009.

Na Figura 31, pode ser observada a variação média dos fluxos de CO₂, a cada 30 minutos, no período diurno, no decorrer do ciclo fenológico da cultura. As magnitudes dos fluxos aumentaram com o crescimento e desenvolvimento da cultura, até atingir o valor máximo no estágio fenológico VT, quando o índice de área foliar apresentou valor máximo de 4 (Figura 32). A partir desse ponto, ocorre a redução na magnitude dos fluxos, acompanhando, aproximadamente, a diminuição do índice de área foliar até a maturação fisiológica.

Fato semelhante foi enfatizado por Escobar (2007), em uma plantação de soja, em que esse autor relata que os fluxos de CO₂ podem ser influenciados, principalmente, pelo estágio de crescimento em que a planta se encontra.

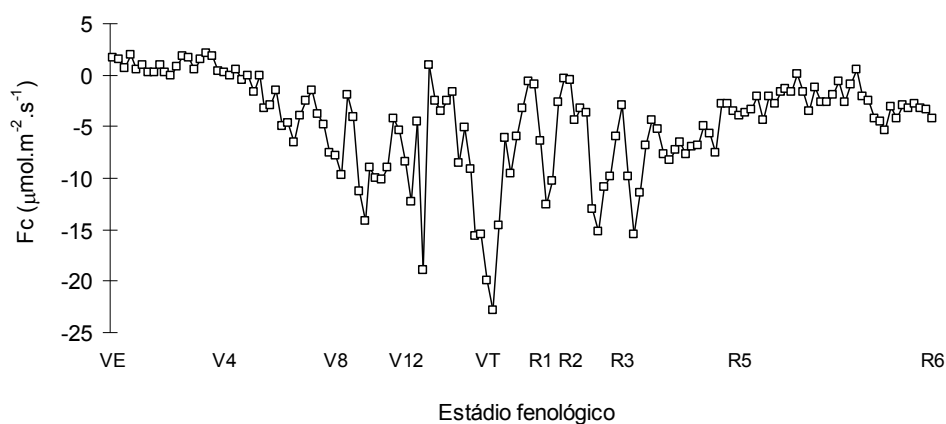


Figura 31 - Variação média diária dos fluxos de CO₂, no decorrer do experimento de outubro de 2008 a março de 2009.

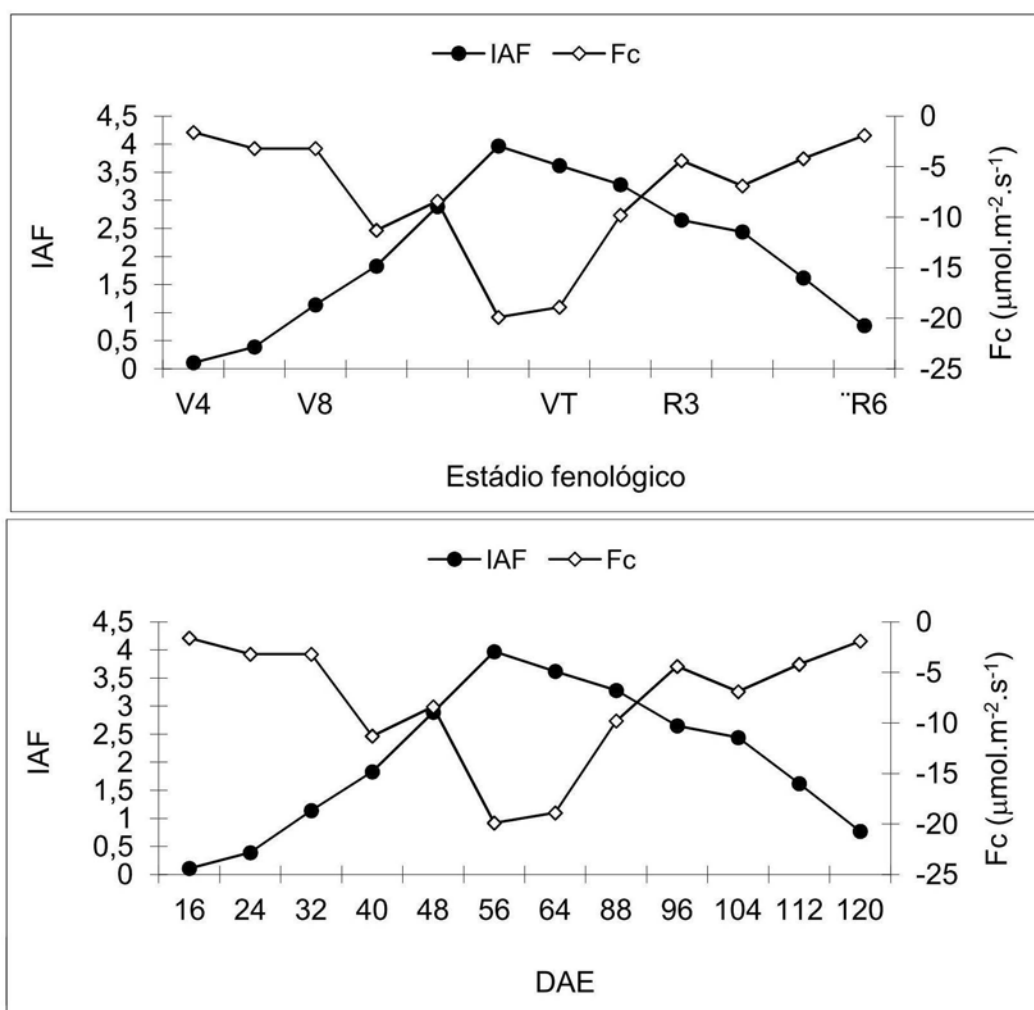


Figura 32 - Variação média do fluxo de CO₂, no decorrer do ciclo da cultura, em razão do índice de área foliar.

4.4. Fluxos de CO₂ durante o período noturno

Os fluxos noturnos de CO₂, que representam as taxas de respiração da parte aérea das plantas, das raízes e do solo, apresentaram pequena variação média no longo do tempo.

Na Figura 33, pode ser observada a variação média horária desses fluxos, entre as 19 e 5 horas, com variação média de 1,69 a 2,35 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

4.5. Fluxos noturnos de CO₂ entre a cultura de milho e a atmosfera

Pode ser observado, na Figura 34, que a velocidade de fricção (U^*) variou de 0,24 a 0,37 m.s^{-1} . Esse parâmetro, que é indicador da intensidade de turbulência, apresenta certa influência no comportamento dos fluxos noturnos de CO₂ (F_c). Tal fato é evidenciado no mês de dezembro, pois a partir de uma hora, quando o U^* apresentou aumento, chegando a 0,35 m.s^{-1} , o fluxo de CO₂ também apresentou aumento, chegando a 4,54 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Segundo Baldocchi (2003), o valor da velocidade de fricção que produz fluxos noturnos de CO₂ não é universal. Massman e Lee (2002) encontraram U^* , que variou entre “0 e 0,6 m.s^{-1} ”, em diferentes tipos de florestas. Carneiro (2007) registrou valores noturnos de U^* , em uma plantação de arroz, que não ultrapassaram 0,2 m.s^{-1} .

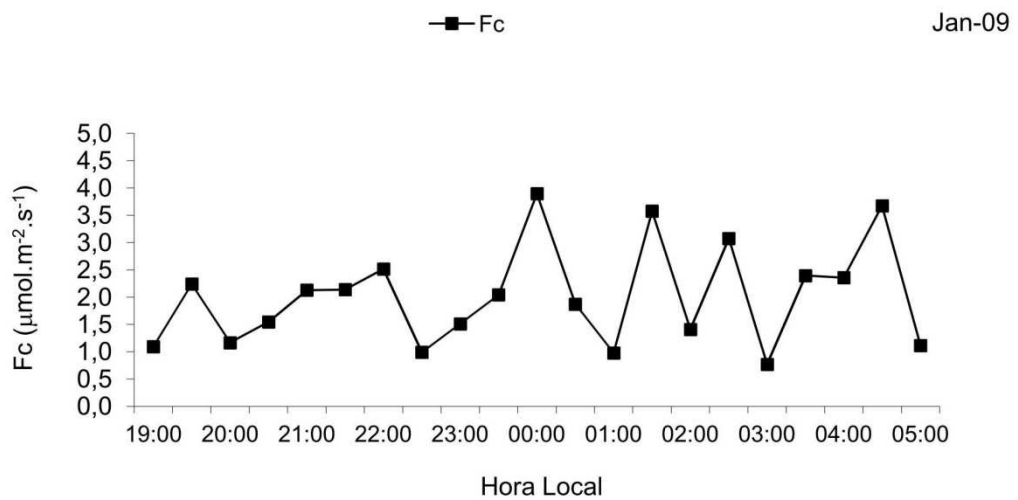
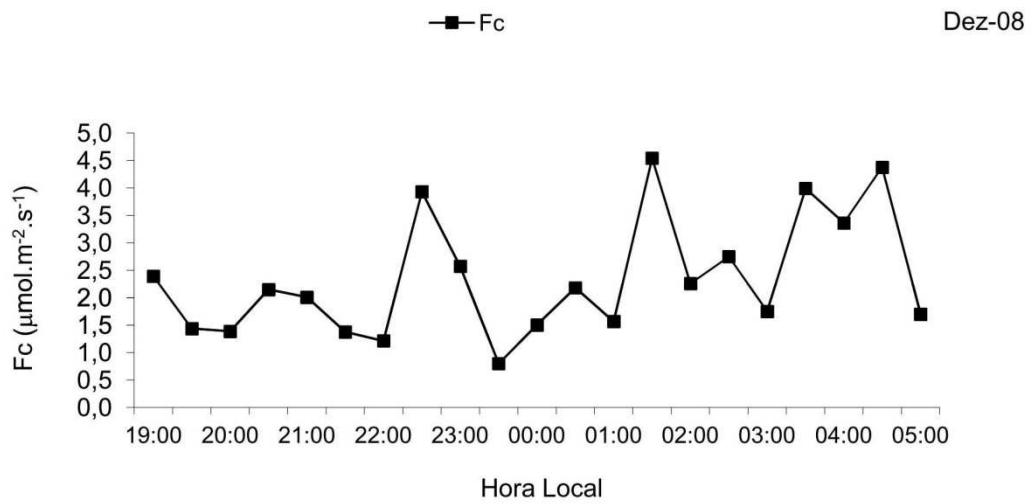
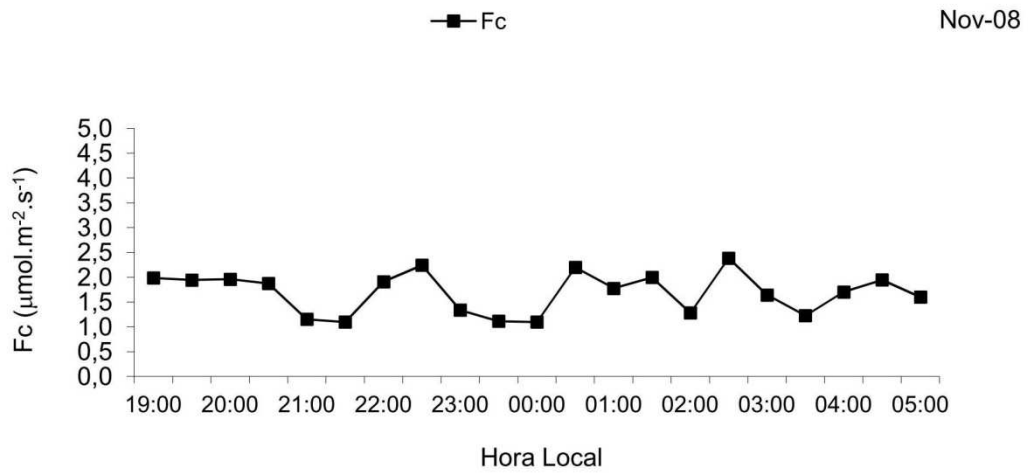


Figura 33 - Variação horária dos valores médios noturnos dos fluxos de CO₂.

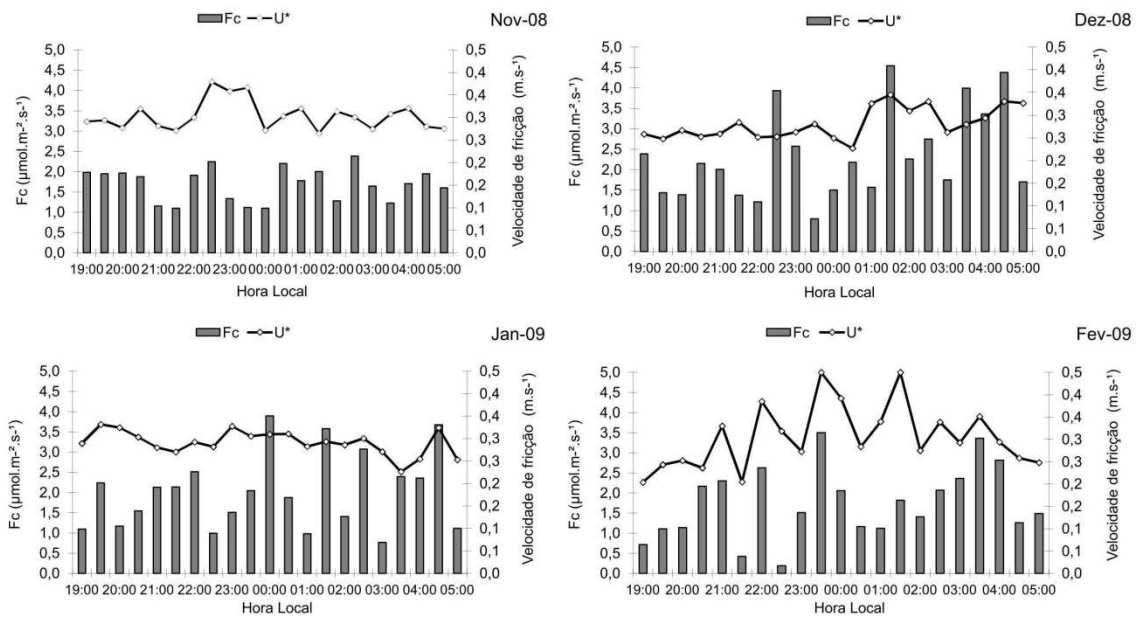


Figura 34 - Variação horária dos valores médios noturnos dos fluxos de CO₂ e da velocidade de fricção.

4.6. Fluxos diurnos de CO₂ entre a cultura de milho e a atmosfera

Nas Figuras 35 e 36, podem ser observadas a variação horária dos valores médios dos fluxos diurnos de CO₂ entre 9 e 16 horas, que representam as taxas de absorção da parte aérea das plantas, das raízes e do solo. O valor médio do fluxo variou entre -3,57 e -10,30 µmol.m⁻².s⁻¹. De acordo com o observado, o valor maior ocorreu no mês de dezembro, em que os horários de maior absorção pela cultura foi de 12 às 13 horas. Essa maior assimilação está de acordo com o desenvolvimento da cultura e seu respectivo estágio, além das condições microclimáticas do ambiente. Na Tabela 6, encontra-se o resumo dos valores encontrados por outros autores em variados ecossistemas e diferenciadas condições de campo. Todavia, os valores pesquisados na literatura se aproximam em magnitude dos fluxos de CO₂ encontrado neste trabalho.

Ainda de acordo com as Figuras 35 e 36, pode ser observado a diminuição na absorção do CO₂ em novembro, caracterizando o fato de a cultura estar na fase de maturação fisiológica onde ocorre pouca troca de CO₂

entre o ambiente e a planta. Nessa fase há ainda a contribuição das trocas gasosas, por causa da presença das plantas espontâneas, além das folhas verdes do próprio milho, colaborando para a troca com o ecossistema.

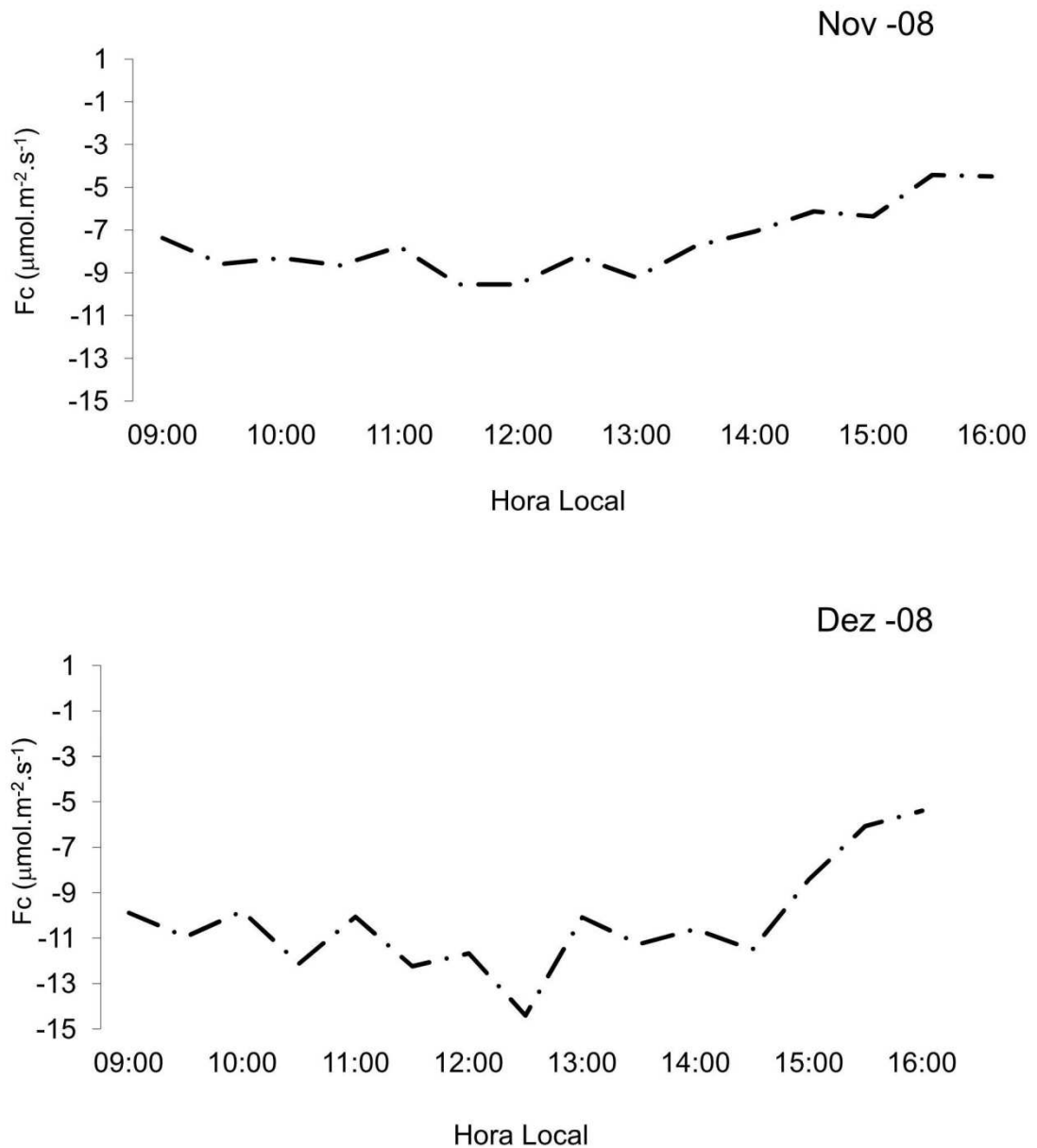


Figura 35 - Variação média dos fluxos de CO₂, no horário diurno, em novembro e dezembro de 2008.

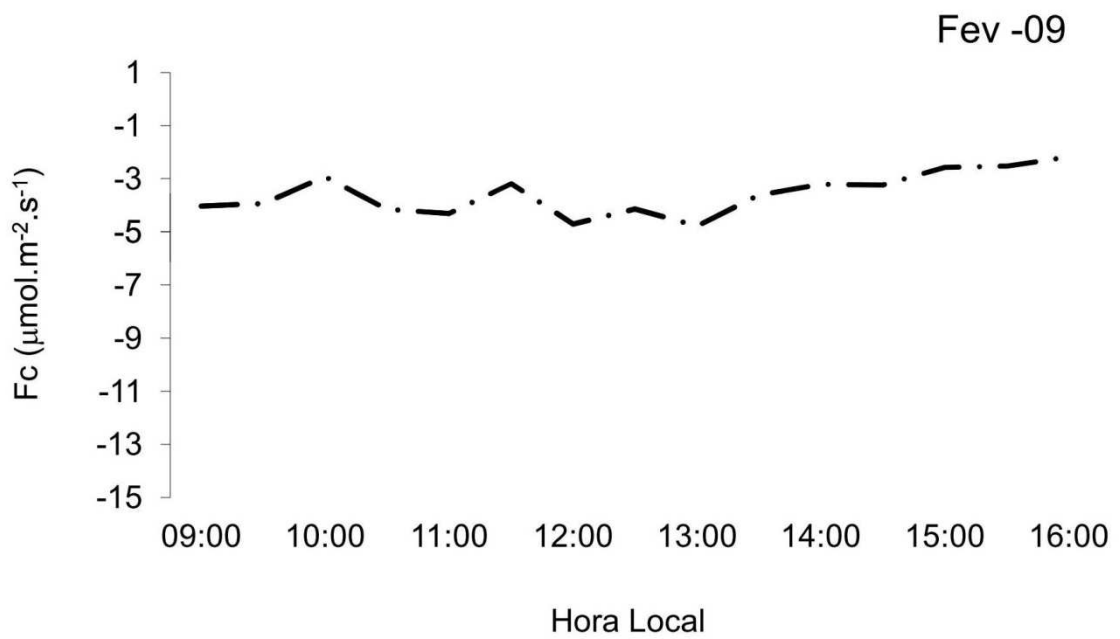
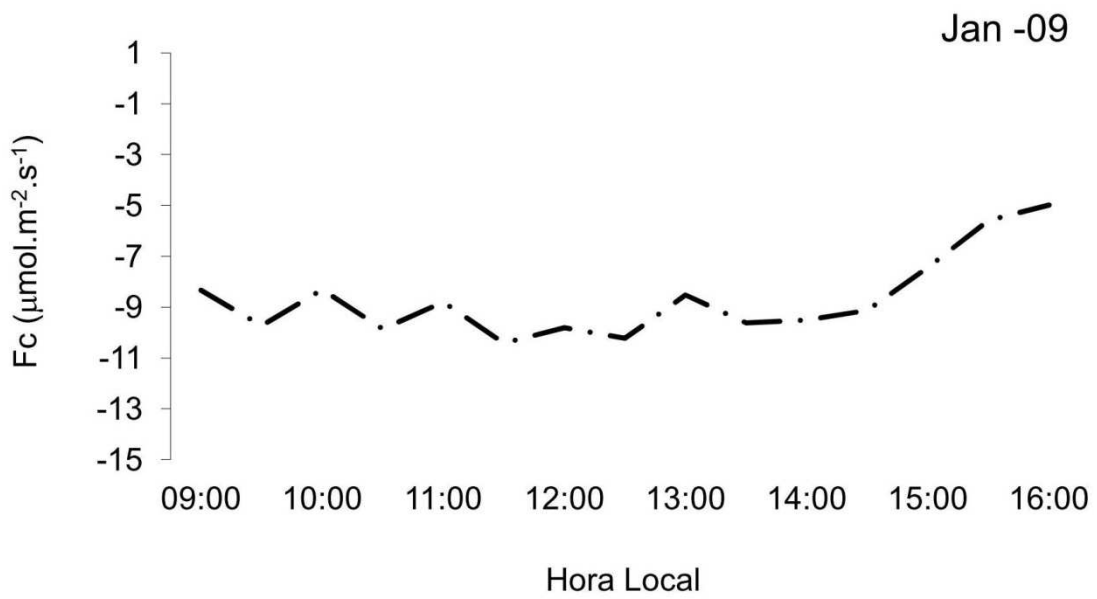


Figura 36 - Variação média dos fluxos de CO_2 , no horário diurno, em janeiro e fevereiro de 2008.

Tabela 6 - Valores de fluxos de CO₂ em variados ecossistemas

Autores	Fc ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Meio	Condição de campo
Malhi et al. (2007)	-18,0	Floresta	Natural
Andrade (2005)	-19,0	Manguezal	Úmido
Carneiro (2001)	-10,7	Arroz	Irrigado
Zimmermann et al. (2007)	-9,7	Soja	Não irrigado
Neves (2006)	-6,7	Feijão Caupi	Não irrigado
Steduto (1998)	-25,0	Milho	Irrigado

A partir de determinado nível de turbulência na atmosfera, há, normalmente, maior mistura, que permite o transporte eficiente do CO₂. Segundo Monteith (1973), caso o transporte turbulento de calor, vapor d'água, CO₂, O₂ e outros constituintes atmosféricos não ocorresse de modo eficiente, uma comunidade de plantas em pleno desenvolvimento consumiria, durante o processo de fotossíntese, em um dia, todo o CO₂ existente em uma camada de, aproximadamente, 30 m acima da cultura.

Com base na Figura 37, é possível observar que no período diurno do mês de dezembro, a menor velocidade de fricção permitiu que o fluxo de CO₂ chegou às 12h30min, ao valor de $-14,41 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Nos meses seguintes, ocorreu aumento na velocidade de fricção, sendo, o mês de fevereiro, período em que o grão já estava em processo de secagem na planta. O aumento da velocidade de fricção chegou a valores de até $0,4 \text{ m.s}^{-1}$, intensificando a troca entre o meio da cultura e a atmosfera.

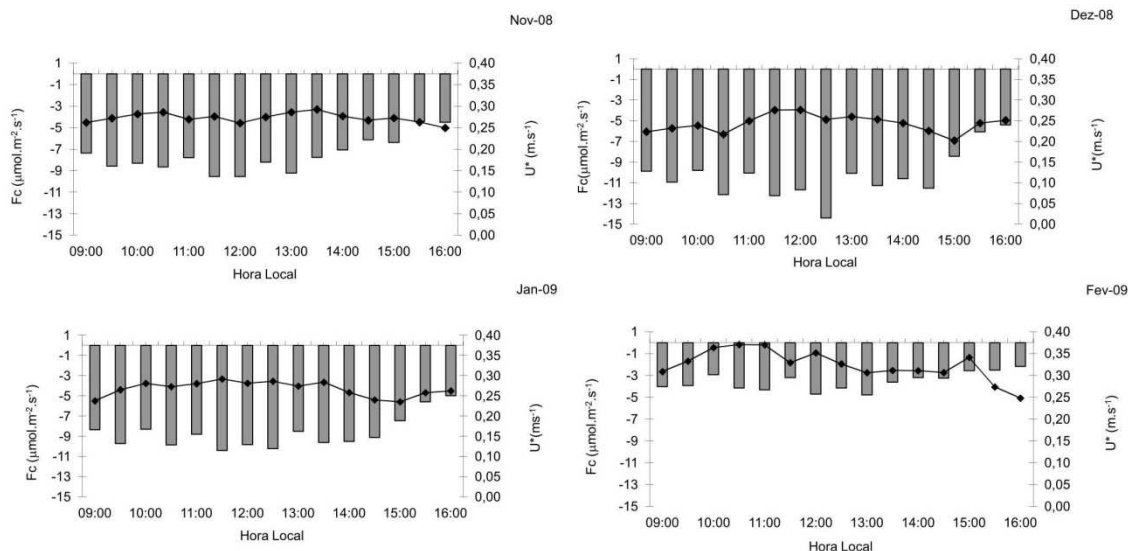


Figura 37 - Variação média dos fluxos de CO₂ no horário diurno e a velocidade de fricção.

4.7. Relações de dependência entre fluxos de CO₂ e as variáveis meteorológicas, a radiação fotossinteticamente ativa e a temperatura do solo

Dentre as variáveis meteorológicas correlacionadas com os fluxos diurnos de CO₂, o saldo de radiação, a radiação fotossinteticamente e a radiação solar global se destacam por governarem os processos fotossintéticos.

Nas Figuras 37 e 38, podem ser observadas as relações (Fc x Rn) e (Fc x RFA) para os meses de novembro de 2008 a janeiro de 2009. Analisando os fluxos de CO₂ e a radiação solar global, no decorrer do ciclo da cultura, a melhor correlação foi obtida para o mês de novembro (Figura 37) com ($r^2 = 0,87$), chegando até ao $r^2 = 0,43$ (Figura 38), no mês de janeiro de 2009. Trabalhando com alfafa, Baldocchi (1981) acrescenta que Fc é dependente da temperatura do ar diante de alto nível de Rn, acima de 400 W.m⁻². Esse autor afirma que Fc é sempre controlado pela radiação solar. Resultados com comportamento semelhante foram obtidos entre os fluxos de CO₂ e a radiação fotossinteticamente ativa no mesmo período avaliado. Todavia, essa relação

apresentou-se menos variável no decorrer do ciclo da cultura, com correlação inferior àquelas alcançadas na relação (Fc x Rn).

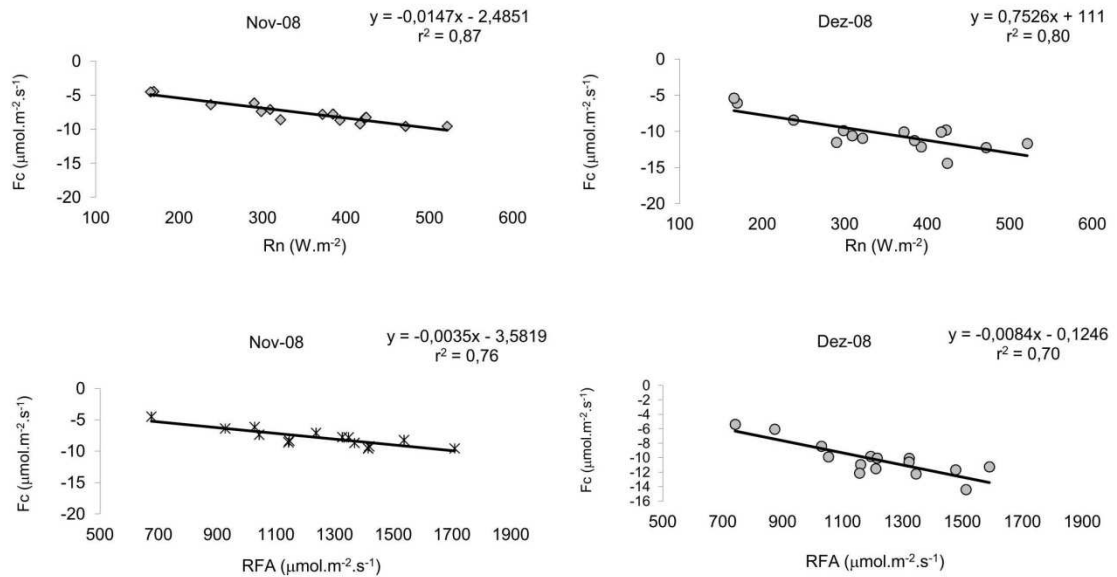


Figura 38 - Relação entre fluxos diurnos de CO₂ (Fc) com o saldo de radiação (Rn) e com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), para os meses de novembro e dezembro de 2008.

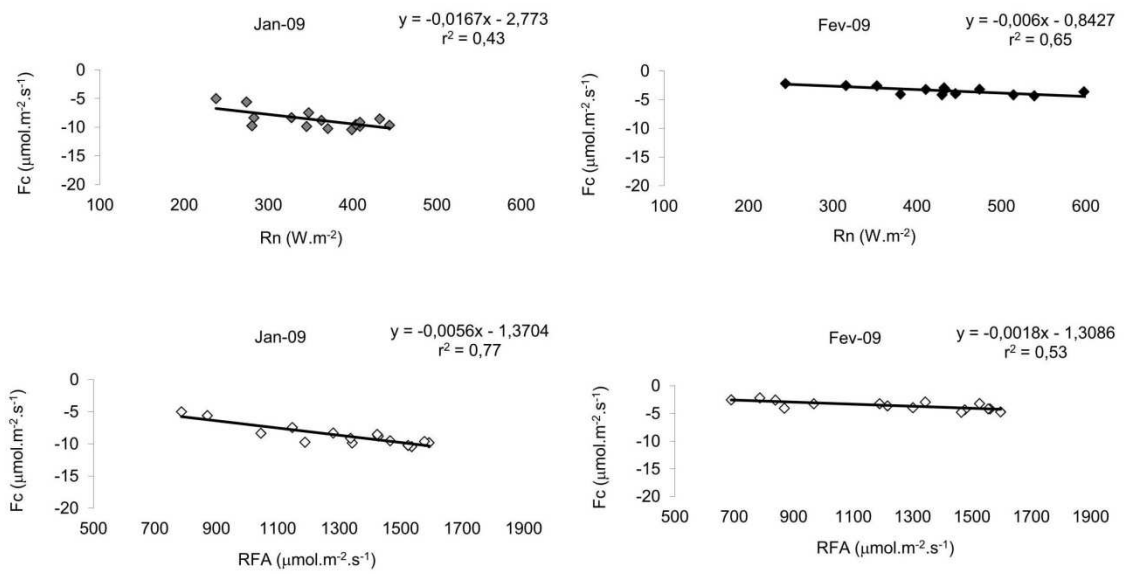


Figura 39 - Relação entre fluxos diurnos de CO₂ (Fc) com o saldo de radiação (Rn) e com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), para os meses de janeiro e fevereiro de 2009.

Na Figura 40, pode ser observada as relações entre o fluxo de CO₂ e a insolação no decorrer do ciclo da cultura.

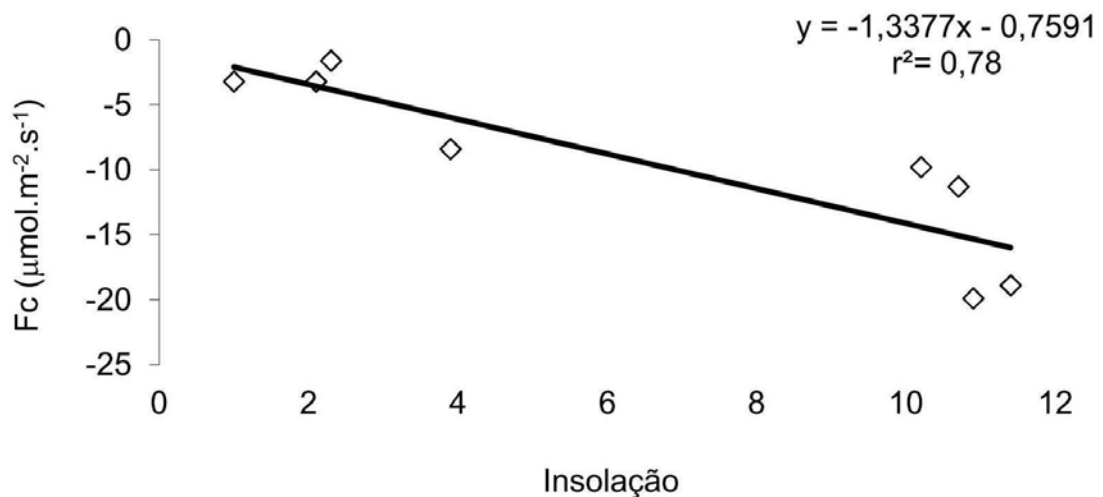


Figura 40 - Relação entre fluxos de CO₂ (Fc) e a duração do brilho solar.

A correlação obtida entre os fluxos de CO₂ e a duração do brilho solar foi influenciada, possivelmente, pelo efeito provocado pela presença de nebulosidade nas relações existentes entre o fluxo de CO₂ e os termos radiativos. Todavia, torna-se evidente que a absorção dos fluxos de CO₂ pela cultura varia, em razão da insolação.

A temperatura do solo (Ts) e as variáveis meteorológicas, temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR) e déficit de pressão de vapor (DPV), também foram correlacionadas com os fluxos diurnos de CO₂. A correlação obtida entre essas variáveis e os fluxos de CO₂ inicialmente apresentou pouca ou nenhuma correlação (Tabela 7).

Tabela 7 - Relação de dependência entre fluxos de CO₂ (Fc) e temperatura do ar (Tar), a umidade relativa (UR), o déficit de pressão de vapor e a temperatura do solo (Ts), durante o ciclo da cultura

	Fc x Tar r^2	Fc x UR r^2	Fc x Ts r^2	Fc x DPV r^2
Nov	0,01	0,06	0,006	0,05
Dez	0,03	0,05	0,08	0,08
Jan	0,14	0,20	0,20	0,20
Fev	0,19	0,23	0,13	0,24

5. CONCLUSÕES

As concentrações de CO₂, durante o ciclo da cultura do milho, variaram de 369 ppm, no período diurno, a 454 ppm, no período noturno; entretanto, a maior amplitude, 60 ppm, ocorreu no período noturno.

O fluxo médio de CO₂, durante o período diurno, foi semelhante a valores encontrados por outros autores, sendo o valor médio de -7,53 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; e, o máximo, de 29,3 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

As taxas de respiração total da cultura (parte aérea + raízes) e do solo apresentaram pequena variação no decorrer do ciclo da cultura (1,69 a 2,35 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

As variáveis mais relevantes na variação dos fluxos diurnos de CO₂ foram a radiação fotossinteticamente ativa, o saldo de radiação e a insolação.

A indústria de ferro-gusa localizada ao leste (E) da área experimental, próximo da torre micrometeorológica, não apresentou maiores influências nos resultados obtidos da concentração de CO₂, em razão, possivelmente, de o seu funcionamento ser noturno, após as 22 horas, período em que o vento predominante registrado foi norte (N).

REFERÊNCIAS

- AIRES, L.M.; PIO, C.A.; PEREIRA, J.S. The effect of drought on energy and water vapour exchange above a Mediterranean C3\C4 grassland in Southern Portugal. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 48, p. 565-579, 2008.
- ALDOCCHI, D.D.; KELLIHER, F.M.; BLACK, J.A. et al. Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. **Global Change Biol.**, v. 6, p. 69-83, 2001.
- ANDERSON, D.A.; TANNEHILL, J.C.; PLETCHER, R.H. **Computational fluid mechanics and heat transfer**. New York: Hemisphere, 1994. 599 p.
- ANDERSON, D.E.; VERMA, S.B. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat exchanges of a grain sorghum canopy. **Boundary Layer Meteorol.**, v. 34, p. 317-331, 1986.
- ANDRADE, V. M. S. **Fluxos de CO₂, vapor d'água e de energia em um ecossistema de manguezal em Bragança-PA**. 2005. 49 f. Dissertação (Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ANGELL, B.F.; DUGAS, W.A. Carbon dioxide fluxes over a northern, semiarid, mixed-grass prairie. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, n. 4, p. 317-326, 2001.
- ANTHONI, P.M.; FREIBAUER, A.; KOLLE, O. et al. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, p. 55-67, 2004.

BALDOCCHI, D.; MEYERS, T. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 90, p. 1-25, 1998.

BALDOCCHI, D.D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and a open C₄ (corn) crop II. CO₂ exchange and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 67, p. 291-321, 1994.

BALDOCCHI, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, p. 479-492, 2003.

BALDOCCHI, D.D. Influence of water stress on the diurnal exchange of mass and energy between the atmosphere and a soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 543-547, 1983.

BALDOCCHI, D.D.; SHASHI, B.; VERMA, A. et al. Mass and energy exchanges of a soybean canopy under various environmental regimes. **American Society of Agronomy**, v. 73, p. 706-710, 1981.

BALDOCCHI, D.; FALGE, A.; LIANHONG, G. et al. A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 11, November 2001.

BAZZAZ, F.A. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. **Annu. Rev. Ecol. Syst.**, v. 21, p. 167-96, 1990.

BISCOE, P.V.; SCOTT, R.K.; MONTEITH, J.L. Barley and its environment: III. Carbon budget of the stand. **J. Appl. Ecol.**, v. 12, p. 269-293, 1975.

BOWEN, A. Water stress induced alterations of the stomatal response to decreases in leaf water potential. **Physiologia Plantarum**, v. 37, n. 1, p 1-5, 1960.

BROWN, K.W.; ROSENBERG, N.J. Concentration of CO₂ in the air above a sugar beet field. **Mon. Weather Rev.**, v. 98, p. 75-82, 1970.

BROWN, K.W.; ROSENBERG, N.J. Energy and CO₂ balance of an irrigated sugar beet (*Beta vulgaris*) field in the great plains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, p. 207-213, 1971.

BRUNINI, O.; MACHADO, E.C.; SAWAZAK, E. et al. Fluxo de gás carbônico sobre as culturas de dois híbridos de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 11, n. 3, p. 161-168, 2001.

CAMPBELL SCIENTIFIC INCORPORATION – CSI. **Temperature and relative humidity probe. Models HMP45C. Manual.** 2007.

CARNEIRO, J.V. **Fluxos turbulentos de CO₂ em uma área de arroz irrigado no RS.** 2007. 57 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

CIAIS, P.; REICHSTEIN, M.; VIOVY, N. et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. **Nature**, v. 437, p. 529-535, 2005.

COSTA, J.M.N. **Notas de aula da disciplina Micrometeorologia.** Viçosa: UFV, 2003. 85 p,

DENMEAD, O.T.; SHAW, R.H. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 52, p. 272-274, 1960.

DESJARDINS, R.L.; LEMON, E.R. Limitations of an eddy-correlation technique for the determination of the carbon dioxide and sensible heat fluxes. **Journal Boundary-Layer Meteorology**, p. 1573-1472, 1974.

ESCOBAR, L.F.; AMADO, T.J.C.; MORAES, O. et al. Fluxo de CO₂ na cultura de soja sob sistema plantio direto avaliado pelo método de covariância dos vórtices. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 2007, Gramado. **Anais...** Gramado, 2007.

FAN, S.M.; WOFSY, S.C.; BAKWIN, P.S. et al. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the Central Amazon Forest, **J. Geophys. Res.**, v. 95, n. D10, p. 851-864, 1990.

FELICIANO, M.J.S. **Deposição seca de poluentes gasosos em ecossistemas do Sul da Europa:** medição e parametrização. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento, 2001. 285 p.

FISCH, G. **Camada limite amazônica:** aspectos observacionais e de modelagem. 1995. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

FRITSCHEN, L.; QIAN, P. Net radiation, sensible and latent heat flux densities on slopes computed by the energy balance method. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 53, n. 1-2, 1990.

- FRITSCHEN, L.; SIMPSON, J.R. Evapotranspiration from forests: measurement and modeling. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, 3, 1985, Chicago. **Proceedings...** St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural Engineers, 1985. p. 393-404.
- GALLON, M.A.M.P.; SANCHES, L.; PAULO, S.R. Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel uma floresta tropical de transição amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 291-300, 2006.
- GILL, A. **Omnidirectional R3-50 research ultrasonic anemometer - user manual**. Lymington, Hampshire, UK: Gill Inst., 2002.
- HALLAUER, A.R.; MIRANDA FILHO, J.B. **Quantitative genetics in maize breeding**. Ames: Iowa University Press, 1988. 468 p.
- HOLLINGER, D.Y.; GOLTZ, S.M.; DAVIDSON, E.A. et al. Seasonal patterns and environmental control of carbon dioxide and water vapour exchange in an ecotonal boreal forest. **Global Change Biology**, v. 5, p. 891-902, 1999.
- JÚNIOR, R.S.; MOURA, M.A.L.; MEIXNER, F.Z. et al. Estudo da concentração de CO₂ atmosféricos em área de pastagem na região Amazônica. **Revista Brasileira Geofísica**, p. 259-270, 2004.
- KAIMAL, J.C.; FINNIGAN, J.J. **Atmospheric boundary layer**. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- KEELING, C.D.; BACASTOW, R.B.; BAINBRIDGE, A.E. et al. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. **Tellus**, v. 29, p. 538-551, 1976.
- KELLER, M.; ALENCAR, A.; ASNER, G.P. et al. Ecological research in the large-scale biosphere-atmosphere experiment in amazonia: early results. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. S3-S16, 2004.
- LAL, R. Effect of constant and fluctuating soil temperature on the growth, development and nutrient uptake of maize seedings. **Plant Soil**, Amsterdam, v. 40, p. 589-606, 1974.
- LAW, B.E.; FALGE, E.; GU, I. et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1/4, p. 97-120, December 2002.
- LSI-LASTEM. **Thermohygrometers MW8007-01/07 Manual 2007**. Disponível em: <<http://www.lsi-lastem.it/pdf/MW8007.pdf>>. Acesso em: mar. 2008.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D.D.; JARVIS, P.C. The carbon of tropical of temperate and boreal forests. **Plant Cell and Environment**, v. 22, p. 715-740, 1998.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R.A.; KILLEEN, T.; WENHONG J.; NOBRE, C.A. **Climate change, deforestation, and the fate of the amazon**.

MARGOLIN, B.Z.; GULENKO, A.G.; KURSEVICH, I.P. Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation: prediction of creep rupture strength for austenitic materials. **Strength of Materials**, v. 38, n. 5, p. 449-457, 2006.

MASSMAN, W.J.; LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in longterm studies of carbon and energy exchanges. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 121-144, 2002.

MONCRIEFF, J. B.; MASSHEDER, J. M.; DE BRUIN, H. et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **J. Hydrol.**, p. 589-611, 1997.

MONTEITH, J.L.; SZEICZ, G. The carbon-dioxide flux over a field of sugar beet. **The Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 86, n. 368, p. 205-214, 1960.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2.ed. New York: Chapman and Hall, 1973.

MORAES, O.L. et al. Fluxos turbulentos: o diálogo entre a superfície e a atmosfera. **Ciência & Ambiente**, n. 34, p. 115-135, 2007.

NOCE, M.A. **Milho variedade BR 106 - técnicas de plantio**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2004. 5 p. (Comunicado Técnico, 109).

OHTAKI, E. Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 29, n. 1, 1984.

OKE, T.R. **Boundary-layer climates**. Routledge: London, 1987.

PEIXOTO, J.P.; OORT, A.H. **Physics of climate**. New, York: American Institute of Physics, 1991.

PEIXOTO, J.P.; OORT, A.R. Physics of climate: a simplified biosphere model for global climate. **Journal of Climate**, v. 4, p. 345-364, 1991.

PINTO, L.D.V.O. **Fluxos de energia sobre uma floresta tropical na Amazônia**. 2003. Tese (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

REEKIE, E.G.; BAZZAZ, F.A. Competition and patterns of resource use among seedlings of five tropical trees grown at ambient and elevated CO₂ **Oecologia**, v. 79, p. 212-222, 1989.

REICHL, G.W. Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies: photosynthetic and phytomas production efficiencies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 49, p. 103-122, 1979.

RIZZO, L.V. **Os fluxos turbulentos de partículas e de compostos orgânicos voláteis, e a distribuição vertical de aerossóis na baixa troposfera da Amazônia**. 2006. 227 f. Tese (Doutorado em Micrometeorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

ROBERTSON, J.; FERRARI, C. Interpretation of raman spectra of disordered and amorphous carbon. **Phys. Rev.**, v. B61, p. 14095-14107, 2000.

ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 495 p.

SCOTT, R.L.; EDWARDS, E.A.; SHUTTLEWORTH, W.J. et al. Interannual and seasonal variation in fluxes of water and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 65-84, 2004.

SILVA, J.R.P. **Balço de carbono sobre uma plantaço de eucalipto: o problema de Quioto**. Instituto Superior Técnico, 2001. 46 p,

SINCLAIR, J.L.C.M.; HRENYA, E.J.; BOLIO, D. et al. Comparison of low Reynolds number $k-\epsilon$ turbulence models in predicting fully developed pipe flow. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 51, n. 12, p. 1923-1941, 1975.

SINCLAIR, J.M.H.; COULTHARD, M. **Towards an analysis of discourse: the English used by teachers and pupils**. Oxford: Oxford University Press, 1975.

STEDUTO, P. Maize canopies under two soil water regimes, L. diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, p. 169-184, 1998.

STERN, V. **The economics of climate change**. New York: Cambridge University Press, 2007.

STULL, R.B. **An Introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Press, 1988.

TOLLEY, L.; STRAIN, B.R. Effects of enrichment and water stress on gas exchange of liquidambar *Sterciflua* and *Pinus taeda* seedlings grown under different irradiance levels. **Oecologia**, v. 65, p. 166-172, 1985.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: INMET, 2001.

VERMA, S.B.; BALDOCCHI, D.D.; ANDERSON, D.E. et al. Eddy fluxes of CO₂, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 36, n. 1-2, 1986.

VERMA, S.B.; KIM, J. Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 52, n. 1-2, 1990.

VERMA, S.B.; ROSENBERG, J. Accuracy of lysimetric, energy balance, and stability-corrected aerodynamic methods of estimating above-canopy flux of CO₂. **American Society of Agronomy**, v. 67, p. 699-704, 1975.

VERMA, S.B.; ROSENBERG, N.J. Carbon dioxide concentration and flux in a large agricultural region of the Great Plains of North America. **J. Geophys. Res.**, v. 81, p. 399-405, 1976.

VIANA, J.H.M.; FILHO, E.I.; SCHAEFER, E.G.R. Effects of wetting and drying cycles on the reorganization of the microgranular structure of latosols. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 28, n. 1, 2005.

WILSON, K.; GOLDSTEIN, A.; FALGE, E. et al. Energy balance closure at fluxnet sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 223-243, 2002.

WOHLFAHRT, G.; ANFANG, C.; BAHN, M. et al. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, p. 141-162, 2005.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; BRASWELL, B.S.B. et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 91, p. 256-270, 2004.

YU, H.; KAUFMAN, Y.J.; CHIN, M. et al. A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 6, p. 613-666, 2006.