

LEONARDO JOSÉ GONÇALVES AGUIAR

**FLUXOS DE MASSA E ENERGIA PARA A CULTURA DE MILHO (*Zea
mays L.*) NO RIO GRANDE DO SUL**

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
2011

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

T

A282f
2011

Aguiar, Leonardo José Gonçalves, 1983-
Fluxos de massa e energia para a cultura do milho
(*Zea mays* L.) no Rio Grande do Sul / Leonardo José
Gonçalves Aguiar. – Viçosa, MG, 2011.
xvii, 92f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: José Maria Nogueira da Costa.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 85-92

1. Meteorologia agrícola. 2. Radiação solar. 3. Balanço de
energia. 4. Milho - Cultivo. 5. Dióxido de carbono.
6. Micrometeorologia. I. Universidade Federal de Viçosa. II.
Título.


CDD 22. ed. 630.2515


LEONARDO JOSÉ GONÇALVES AGUIAR


**FLUXOS DE MASSA E ENERGIA PARA A CULTURA DE MILHO
(*Zea mays* L.) NO RIO GRANDE DO SUL**

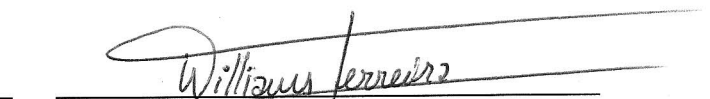
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

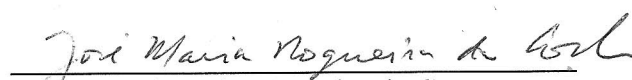
APROVADA: 02 de agosto de 2011.


Francisca Zenaide de Lima


Marcos Antônio Vanderlei Silva


Ana Cláudia Mendes Malhado


Williams Pinto Marques Ferreira
(Coorientador)


José Maria Nogueira da Costa
(Orientador)

Penso noventa e nove vezes
e nada descubro; deixo de pensar,
mergulho em profundo silêncio – e eis
que a verdade me é revelada.
(Albert Einstein)

À minha mãe Maria Bernadete Veras Aguiar.

Ao meu pai José Gonçalves Lima.

À minha companheira Graciela Redies Fischer.

Às minhas irmãs Renata, Emanuelle e Fátima.

À minha sobrinha Natália Aguiar Ribeiro.

AGRADECIMENTOS

- À minha mãe Maria Bernadete Veras Aguiar por seu amor e por ter sempre me incentivado.
- Ao meu pai José Gonçalves Lima por seu afeto.
- À minha companheira Graciela Redies Fischer pelas contribuições e principalmente pela paciência que teve na fase final do meu doutorado.
- À minha irmã Renata Gonçalves Aguiar pelo incentivo e por me forçar, mesmo que inconscientemente, a crescer cada vez mais.
- Às minhas irmãs Emanuelle de Lima Aguiar e Fátima Samanta Gonçalves Lima pelo carinho.
- Ao meu cunhado Emerson da Silva Ribeiro por sua amizade.
- Aos meus tios pelo carinho que sempre me demonstraram, em especial aos meus tios Francisco Sales Veras Aguiar e João Eudes Veras Aguiar e minhas tias Ionice Aguiar e Margarida Maria Veras Aguiar.
- Aos meus amigos Evandro (Tche), Leonardo (Coelho), Paulo (Ciclone), Sérgio (Carioca) e Walter pelas discussões científicas que tivemos durante o doutorado, principalmente as que ocorreram após o expediente de trabalho.
- Aos meus amigos Richard (Ricardão) e Ana (Anhoca) pela amizade e pela grande contribuição para o meu crescimento na escrita de artigos científicos.

- Ao professor José Maria Nogueira da Costa pela orientação ao longo dos quatro anos da tese.
- Aos coorientadores, professora Débora Regina Roberti, professor Flávio Barbosa Justino e Dr. Williams Pinto Marques Ferreira pela valorosa contribuição na tese.
- Aos professores do programa de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelo conhecimento transmitido.
- À Graça, excelente secretária da meteorologia agrícola, pela ajuda e amizade ao longo do doutorado.
- Aos colegas pós graduandos do programa de Meteorologia Agrícola da UFV.
- Aos alunos da Universidade Federal de Santa Maria, Cláudio, Daniel, Júlio, Hans e Virnei pela colaboração na montagem do experimento e na coleta dos dados.
- Aos membros da banca professora Ana Cláudia Mendes Malhado, Dra. Francisca Zenaide de Lima, professor Marcos Antônio Vanderlei Silva e Dr. Williams Pinto Marques Ferreira, pelas contribuições.
- À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.
- À CAPES pelo suporte financeiro.

BIOGRAFIA

LEONARDO JOSÉ GONÇALVES AGUIAR, filho de José Gonçalves Lima e Maria Bernadete Veras Aguiar, nasceu em 03 de junho de 1983, em Ji-Paraná, estado de Rondônia.

Em julho de 2005, graduou-se em Licenciatura Plena em Matemática, pela Universidade Federal de Rondônia (UNIR), em Ji-Paraná, Rondônia.

Ingressou na Universidade Federal de Viçosa, MG, em agosto de 2005, iniciando o Curso de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas, obtendo o título de *Magister Scientiae* em agosto de 2007.

Em agosto de 2007 iniciou o Curso de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Doutorado, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas na Universidade Federal de Viçosa (UFV), tendo sua tese defendida no dia 02 de agosto de 2011.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. A Cultura do Milho	4
2.1.1. Fenologia	4
2.1.2. O milho no Brasil	5
2.1.3. Efeitos do clima	6
2.1.3.1. Temperatura	6
2.1.3.2. Precipitação pluvial.....	7
2.1.3.3. Radiação solar.....	8
2.1.4. Fotossíntese e absorção de dióxido de carbono	9
2.1.5. Balanço de energia em superfície vegetada	11
2.2. Técnica de Covariância de Vórtices Turbulentos.....	13
2.2.1. O filtro u^*	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1. Área de Estudo e Tratos Culturais.....	18
3.2. Aquisição dos Dados	19
3.2.1. Variáveis meteorológicas e do solo.....	19
3.2.2. Instrumentos e métodos utilizados na determinação dos fluxos de massa e energia	21
3.2.2.1. Cálculo dos fluxos turbulentos.....	22
3.2.2.2. Método para medir a acurácia dos fluxos de energia.....	24
3.2.2.3. Preenchimento de falhas.....	24

3.2.3. Medições fenológicas e índices fisiológicos	25
3.3. Estimativas de Variáveis	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1. Fenologia da Cultura.....	27
4.2. Variáveis Meteorológicas	29
4.2.1. Normais climatológicas	29
4.2.2. Variabilidade diária.....	30
4.2.3. Variabilidade horária.....	40
4.3. Interação da Radiação Fotossinteticamente Ativa com a Vegetação.....	46
4.4. Fluxo de Dióxido de Carbono	51
4.4.1. Efeitos da Nebulosidade na Absorção do CO ₂	60
4.5. Balanço de Energia	67
4.5.1. Variabilidade horária.....	80
5. CONCLUSÕES	83
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação da camada limite em uma superfície com cobertura descontínua.....	15
Figura 2. Localização do sítio experimental no Estado do Rio Grande do Sul.....	18
Figura 3. Instrumentos utilizados na parcela experimental.....	20
Figura 4. Analisador de gás por infravermelho LI-7500 (a) e anemômetro sônico CSAT3 3-D (b).....	22
Figura 5. Índice de área foliar ao longo do ciclo da cultura.....	29
Figura 6. Ciclo anual da precipitação pluvial (Prec) e temperaturas do ar máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) em que “N” refere-se aos valores das normais climatológicas e “E” aos valores do período experimental.....	30
Figura 7. Precipitação pluvial ao longo do ciclo da cultura.....	31
Figura 8. Umidade do solo e ponto de murcha permanente (PMP) ao longo do ciclo da cultura.....	32
Figura 9. Temperaturas média (T_{med}), mínima (T_{min}) e máxima (T_{max}) do ar ao longo do ciclo da cultura.....	33
Figura 10. Déficit de pressão de vapor (Δe) ao longo do ciclo da cultura.....	35

Figura 11.	Valores de irradiância solar incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}), radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}) e saldo de radiação (R_n) ao longo do ciclo da cultura.....	36
Figura 12.	Índice de área foliar (IAF), albedo (Albedo) e coeficiente de reflexão da radiação fotossinteticamente ativa (CR_{PAR}) ao longo do ciclo da cultura.....	38
Figura 13.	Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) com o albedo e o coeficiente de reflexão da radiação fotossinteticamente ativa (CR_{PAR}).....	39
Figura 14.	Ciclo médio diário da temperatura do ar nos períodos P1, P3 e P4.....	40
Figura 15.	Ciclo médio diário do déficit de pressão de vapor (Δe) nos períodos P1, P3 e P4.....	41
Figura 16.	Ciclo médio diário da irradiância solar incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}) e radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}) nos períodos P1, P2, P3 e P4.....	43
Figura 17.	Ciclo médio diário do índice de claridade nos períodos P1, P2, P3 e P4.....	44
Figura 18.	Ciclo médio diário do albedo nos períodos P1, P3 e P4.....	45
Figura 19.	Ciclo médio diário do coeficiente de reflexão da radiação fotossinteticamente ativa nos períodos P1, P3 e P4.....	45
Figura 20.	Índice de área foliar (IAF), PAR incidente (PAR_{in}), PAR incidente na base do dossel (PAR_{inb}) e PAR absorvida (PAR_{abs}) ao longo do ciclo da cultura.....	46
Figura 21.	Valores do índice de área foliar (IAF) da cultura acima de 40 cm de altura da superfície e fração da PAR absorvida (FAPAR) ao longo do ciclo da cultura.....	47
Figura 22.	Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) da cultura acima de 40 cm de altura da superfície e da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR).....	48
Figura 23.	Ciclo médio diário da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}), incidente na base da cultura (PAR_{inb}) e absorvida (PAR_{abs}) nos períodos P1, P3 e P4.....	50
Figura 24.	Ciclo médio diário da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) nos períodos P1, P3 e P4.....	51

Figura 25.	Variabilidade do índice de área foliar (IAF) e fluxos de carbono diurno (Diurno) e noturno (Noturno) ao longo do ciclo da cultura.....	52
Figura 26.	Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) e dos fluxos de carbono diurno (Diurno) e noturno (Noturno) ao longo do ciclo da cultura.....	53
Figura 27.	Relação entre os valores médios horários da PAR_{abs} e do fluxo de CO_2 diurno para os períodos P1, P3 e P4.....	55
Figura 28.	Relação entre os valores horários da velocidade de fricção (u^*) e do fluxo de CO_2 nos períodos P1, P2, P3 e P4.....	56
Figura 29.	Relação entre os valores horários da PAR_{abs} e do fluxo de CO_2 para os períodos P1, P3 e P4.....	57
Figura 30.	Relação entre os valores horários do déficit de pressão de vapor (Δe) e do fluxo de CO_2 diurno nos períodos P1, P3 e P4.....	59
Figura 31.	Relação entre os valores horários da temperatura do solo à 10 cm de profundidade e do fluxo de CO_2 noturno ao longo do ciclo da cultura.....	60
Figura 32.	Relação entre o índice de claridade e o fluxo de carbono no período de 61 a 98 DAE.....	61
Figura 33.	Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o fluxo de carbono no período de 61 a 98 DAE.....	62
Figura 34.	Relação entre a PAR_{in} e o fluxo de CO_2 nas três classes avaliadas.....	63
Figura 35.	Relação entre a PAR_{in} e a PAR_{inb} nas três classes avaliadas.....	64
Figura 36.	Relação entre o índice de claridade e o fluxo de CO_2 nas três classes avaliadas.....	66
Figura 37.	Ciclo médio horário do fluxo de CO_2 nas três classes avaliadas.....	67
Figura 38.	Fechamento do balanço de energia para valores horários ao longo do ciclo da cultura.....	68
Figura 39.	Fluxos de calor sensível (H), latente (LE) e no solo (G) ao longo do ciclo da cultura.....	69
Figura 40.	Evapotranspiração (ET) ao longo do ciclo da cultura.....	70

Figura 41.	Partição do saldo de energia para os fluxos de calor sensível (H/R_n), calor latente (LE/R_n) e calor no solo (G/R_n) ao longo do ciclo da cultura.....	72
Figura 42.	Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) e das frações H/R_n (a), LE/R_n (b) e G/R_n (c).....	74
Figura 43.	Relação entre os valores horários do saldo de radiação (R_n) e do fluxo de calor sensível (H).....	75
Figura 44.	Relação entre os valores horários do saldo de radiação (R_n) e do fluxo de calor latente (LE).....	76
Figura 45.	Relação entre os valores horários da temperatura do ar e do fluxo de calor sensível (H) para os períodos P1, P3 e P4.....	77
Figura 46.	Relação entre os valores horários do déficit de pressão de vapor (Δe) e do fluxo de calor latente (LE) para os períodos P1, P3 e P4.....	78
Figura 47.	Razão de Bowen (β) ao longo do ciclo da cultura.....	79
Figura 48.	Relação entre o índice de área foliar (IAF) e a razão de Bowen (β).....	80
Figura 49.	Ciclo médio diário do saldo de radiação (R_n) e dos fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e calor no solo (G) nos períodos P1, P2, P3 e P4.....	81
Figura 50.	Ciclo médio diário da razão de Bowen (β) nos períodos P1, P2, P3 e P4.....	82

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1.	Variáveis meteorológicas mensuradas, instrumentos utilizados e suas respectivas alturas de instalação.....	21
Tabela 2.	Estádios fenológicos da cultura do milho.....	28
Tabela 3.	Precipitação pluvial e umidade do solo ao longo do ciclo da cultura.....	32
Tabela 4.	Temperaturas média (T_{med}), mínima (T_{min}) e máxima (T_{max}) do ar, pressão de saturação do vapor d'água (e_s), pressão atual de vapor d'água (e) e déficit de pressão de vapor (Δe)..	33
Tabela 5.	Valores de irradiância solar incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}), radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}), albedo e coeficiente de reflexão da radiação PAR (CR_{PAR}), saldo de radiação (R_n), índice de claridade (k_t) e índice de área foliar (IAF). Os valores de radiação estão em $MJ.m^{-2}.d^{-1}$, os de albedo e CR_{PAR} estão em %, o k_t é adimensional e o IAF está em $m^2.m^{-2}$	37
Tabela 6.	Valores da PAR incidente (PAR_{in}), PAR incidente na base do dossel (PAR_{inb}), PAR interceptada (PAR_{int}), fração da PAR interceptada (FIPAR), PAR absorvida (PAR_{abs}) e fração da PAR absorvida (FAPAR).....	49
Tabela 7.	Valores do índice de área foliar (IAF) e fluxos de carbono diário (F_c Diário), diurno (F_c Diurno) e noturno (F_c Noturno)...	54
Tabela 8.	Valores diários do índice de claridade (k_t), fluxo de carbono (F_c), índice de área foliar (IAF), radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e umidade do solo (U_{solo}).....	63

Tabela 9.	Valores do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e evapotranspiração (ET).....	71
Tabela 10.	Partição do saldo de radiação entre os fluxos de calor sensível (H/R_n), calor latente (LE/R_n) e calor no solo (G/R_n)..	73

RESUMO

AGUIAR, Leonardo José Gonçalves, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2011. **Fluxos de massa e energia para a cultura de milho (*Zea mays L.*) no Rio Grande do Sul.** Orientador: José Maria Nogueira da Costa. Coorientadores: Débora Regina Roberti, Flávio Barbosa Justino e Williams Pinto Marques Ferreira.

A cultura do milho desempenha importante papel na agricultura brasileira, sendo cultivada em todo o território nacional. Um melhor entendimento da interação solo-planta-atmosfera pode ocasionar em aumento da produtividade da cultura, bem como auxiliar no desenvolvimento de modelos que melhor representem essa interação. Devido a isso, teve-se como objetivo no presente trabalho analisar a interação da radiação fotossinteticamente ativa com o dossel da cultura, quantificar as magnitudes e as variações dos fluxos de CO₂, calor sensível (H), calor latente (LE), e calor no solo (G) durante as fases fenológicas da cultura do milho, bem como avaliar a influência de variáveis biofísicas relevantes na magnitude desses fluxos. Para isso, foram realizadas medições contínuas de irradiância solar global incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}), radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}), incidente na base do dossel (PAR_{inb}) e refletida (PAR_{out}), saldo de radiação (R_n), temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR), temperatura do solo a 10 cm de profundidade (T_s), umidade do solo na camada de 0 a 30 cm de profundidade (U_{SOLO}), precipitação pluvial e fluxos de CO₂, H, LE e G no período de 11 de novembro de 2010 a 19 de fevereiro de 2011 sobre uma cultura de milho cultivada no sítio experimental pertencente à Rede SULFLUX, situado na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa (FUNDACEP) (28°36' S; 53°40' O; 409 m de altitude), localizada no município de Cruz Alta, no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Também foram realizadas medições da área foliar ao longo do ciclo da cultura, com periodicidade média de 15 dias, para o cálculo do índice de área foliar (IAF). Os fluxos de CO₂, H e LE foram medidos através

da técnica micrometeorológica *Eddy Covariance*. A menor cobertura de nuvens no período da tarde proporcionou maiores quantidades de S_{in} e PAR_{in} , proporcionando maiores valores da PAR_{inb} , PAR_{abs} e do R_n . No período P1 (VE-V11), a fração da PAR_{abs} (FAPAR) apresentou tendência de diminuição à medida que a elevação solar aumentou, enquanto que nos períodos P3 (R1-R2) e P4 (R3-R6) houve leve tendência de aumento ao longo do dia, ocasionada provavelmente pela maior quantidade de PAR_{inb} aliada à maior capacidade de absorção das folhas do dossel inferior. As variações horários do fluxo de CO_2 diurno foram melhores correlacionadas com a PAR_{abs} , enquanto que o fluxo de CO_2 noturno apresentou relação exponencial com a temperatura do solo a 10 cm de profundidade. A magnitude dos fluxos de CO_2 da cultura apresentaram dependência com relação à nebulosidade, havendo maior absorção de carbono a níveis intermediários de cobertura de nuvens, ocasionada pela maior quantidade de radiação que chega a níveis mais baixos no dossel, bem como melhor rendimento quântico da cultura. O balanço de energia da cultura apresentou bom fechamento, com coeficiente de inclinação da reta de 0,82 e r^2 de 0,96. Os valores horários dos fluxos de H e LE obtiveram melhores correlações com o R_n , enquanto que os diários apresentaram boa correlação com o IAF. O LE foi responsável pela utilização da maior parte da energia disponível, principalmente nos períodos P2 (V12-VT) (75,88%) e P3 (73,07%), em que o IAF da cultura foi maior. Nos períodos P1 e P4 o LE consumiu cerca de 46,62 e 52,26% do R_n , respectivamente. O fluxo de H foi responsável pela utilização de 37,49, 11,56 e 11,77 e 39,75% nos períodos P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Por sua vez, a fração da energia disponível destinada para aquecer o solo foi de 4,95, 3,83, 1,60 e 1,44% nos períodos P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Os resultados apresentados neste estudo aliados à modelagem podem contribuir para entendimento de como as mudanças climáticas influenciarão a cultura do milho.

ABSTRACT

AGUIAR, Leonardo José Gonçalves, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2011. **Mass and energy flows to maize crop (*Zea mays L.*) in the state of Rio Grande do Sul, Brazil.** Adviser: José Maria Nogueira da Costa. Co-Advisers: Débora Regina Roberti, Flávio Barbosa Justino e Williams Pinto Marques Ferreira.

Maize (corn) plays an important role in Brazilian agriculture and is cultivated throughout the country. A better understanding of soil-maize-atmosphere interaction may result in increased crop productivity as well as assist in developing models that better represent this interaction. Therefore, the aim of this work is to analyze the interaction of photosynthetically active radiation (PAR) and the crop canopy, to quantify the magnitude and variation of fluxes of CO₂, sensible heat (H), latent heat (LE) and soil heat (G) during the phenological stages of maize, and to assess the influence of biophysical variables relevant to the magnitude of these flows. To achieve this, we carried out continuous measurements of incident (S_{in}) and reflected (S_{out}) global solar irradiance, incident photosynthetically active radiation (PAR_{in}), incident PAR at the base of the canopy (PAR_{inb}) and reflected PAR (PAR_{out}), net radiation (R_n), air temperature (T) and relative humidity (UR), soil temperature at 10 cm depth (T_s), soil moisture in the layer from 0 to 30 cm depth (U_{SOLO}), rainfall and fluxes of CO₂, H, LE and G in the period from November 11, 2010 to February 19, 2011 on a maize crop grown in the experimental site belonging to the Network SULFLUX, located at the Foundation Center for Experimentation and Research (FUNDACEP) (28°36' S, 53°40' W; 409 m altitude), located in Cruz Alta, in the State of Rio Grande do Sul, Brazil. Measurements were also made of leaf area during the crop cycle, with average periodicity of 15 days, in order to calculate the leaf area index (LAI). The fluxes of CO₂, H and LE were measured by the Eddy Covariance micrometeorological technique. The decreased cloud cover in the afternoon resulted in higher amounts of S_{in} and PAR_{in}, thereby causing

higher values of PAR_{inb} , PAR_{abs} and R_n . In the period P1 (VE-V11), the fraction of PAR_{abs} (FAPAR) tended to decrease as the solar elevation increased, while in periods P3 (R1-R2) and P4 (R3-R6) there was a slight upward trend throughout the day, probably caused by the high amount of PAR_{inb} combined with greater absorption by lower canopy leaves. Hourly variations of the diurnal flux of CO_2 were better correlated with PAR_{abs} , while the nocturnal flux of CO_2 presented an exponential relationship with soil temperature at 10 cm depth. The magnitude of CO_2 fluxes showed dependence on cloudiness, with greater absorption of carbon at intermediate levels of cloud cover due to the higher amount of radiation that reaches the lower levels in the canopy as well as better quantum yield of the crop. Energy balance of the plants had good closure, with a slope of 0.82 and r^2 of 0.96. The hourly values of H and LE fluxes were better correlated with R_n , while the daily measurements were strongly correlated with IAF. LE was responsible for most of the available energy use, especially during P2 (V12-VT) (75.88%) and P3 (73.07%) periods, during which the IAF of the culture was higher. During the periods P1 and P4, LE consumed about 46.62 and 52.26% of R_n , respectively. The flux of H was responsible for the use of 37.49, 11.56 and 11.77 and 39.75% of energy in the periods P1, P2, P3 and P4, respectively. In turn, the fraction of available energy used to heat the soil was 4.95, 3.83, 1.60 and 1.44% in the periods P1, P2, P3 and P4, respectively. The results presented in this study, when combined with modeling, can contribute to our understanding of how climate change may affect future production of maize in Brazil.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o milho é cultivado em todas as regiões geográficas, com área plantada superior a 13,28 milhões de hectares, representando aproximadamente 27% da área plantada com grãos no país (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2011), o que deixa o país em posição de destaque na produção do grão, sendo o terceiro maior produtor mundial (USDA-FAS, 2011). Para o Estado do Rio Grande do Sul, o milho é uma cultura de grande importância sócio-econômica, principalmente por ser produzido em pequenas e médias propriedades, proporcionando a principal fonte de renda a esse segmento de produtores rurais (MARTINS, 2010).

Apesar do grande volume de milho produzido, quando se trata de produtividade, o Brasil ainda está longe daquelas alcançadas por países como a Itália ($9,77 \text{ t.ha}^{-1}$), Canadá ($9,74 \text{ t.ha}^{-1}$) e Estados Unidos ($9,59 \text{ t.ha}^{-1}$) (USDA-FAS, 2011). Atualmente, a produtividade média do Brasil é de $4,185 \text{ t.ha}^{-1}$ (CONAB, 2011).

Uma forma de aumentar a produção do milho no Brasil seria por meio de melhoramento genético e melhor manejo da cultura, bem como a utilização de cultivares adequados para cada região, o que aumentaria o rendimento da cultura. Porém, para que isso ocorra, é imprescindível o conhecimento de como o crescimento e, conseqüentemente, o rendimento da cultura são afetados pelas variáveis climáticas, como a radiação solar, por exemplo, uma vez que a disponibilidade da mesma é um dos fatores que afetam significativamente o crescimento e a produção das culturas (LACERDA et al., 2010).

Adicionalmente, para se avaliar o impacto do aquecimento global sobre as culturas agrícolas e a confiabilidade das metodologias utilizadas, é imprescindível que se estabeleça experimentalmente as relações de dependência dos fluxos de CO₂ entre a cultura e a atmosfera, associadas aos componentes do balanço de radiação e de energia da cultura com as variáveis biofísicas que controlam as magnitudes desses fluxos.

Tais estudos experimentais tornaram-se mais comuns recentemente com o progresso nas técnicas micrometeorológicas de medições de fluxos de massa e de energia, baseado na covariância de vórtices turbulentos, como o desenvolvido por Moncrieff et al. (1997). A técnica de covariância de vórtices turbulentos já vem sendo utilizada com sucesso por vários pesquisadores, pelo potencial que apresenta de integrar as respostas da cultura durante seu ciclo às variações ambientais e fisiológicas, já que com o conhecimento das magnitudes dos fluxos de massa e energia pode-se analisar as variações nas taxas fotossintéticas (NEWTON, 1995) e as variações nas trocas de vapor d'água (KIMBALL, 1983).

O conhecimento das interações do sistema solo-planta-atmosfera tem sido bem difundido na Europa e nos Estados Unidos da América, onde vários estudos experimentais sobre fluxos de massa e energia já foram realizados em diferentes culturas: milho (SOEGARD et al., 2003; SUYKER et al., 2004; MEYERS e HOLLINGER, 2004; SUYKER et al., 2005; VERMA et al., 2005; SUYKER e VERMA, 2010; KAR e KUMAR, 2010), arroz (CAMPBELL et al., 2001), soja (MEYERS e HOLLINGER, 2004; VERMA et al., 2005; SUYKER e VERMA, 2010), sorgo (ANDERSON e VERMA 1986), trigo (SOEGARD et al., 2003). Todavia, apesar de haver alguns trabalhos sobre fluxos de CO₂ em culturas no Brasil, como, por exemplo, os de Carneiro (2007) (arroz), Neves (2005) (feijão caupi) e Andrade (2009) (milho), ainda há carência desses estudos experimentais, não só em relação ao milho, mas a todas as demais culturas agrícolas, comprometendo consideravelmente as simulações feitas sobre as conseqüências do aquecimento global na agricultura brasileira.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho:

- Analisar a interação da radiação fotossinteticamente ativa com o dossel da cultura durante as fases fenológicas;

- Quantificar as magnitudes e as variações dos fluxos de CO₂, calor latente, calor sensível e calor no solo durante as fases fenológicas da cultura do milho;
- Analisar a influência de variáveis meteorológicas e do índice de área foliar na magnitude desses fluxos;
- Analisar a variação da razão de Bowen (relação entre os fluxos de calor sensível e calor latente) durante o ciclo da cultura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A Cultura do Milho

2.1.1. Fenologia

O milho (*Zea mays L.*) é uma planta originária da América, sendo que o primeiro relato da planta foi realizado por Cristóvão Colombo em Cuba. Graças à expedição de Colombo, o milho foi disseminado para a Europa e atualmente é cultivado na Ásia, África, Américas Central do Norte e do Sul, e Europa. Devido ao grande poder de adaptação, o milho é cultivado desde o nível do mar até altitudes acima de 4.000 m, e latitudes de 55°N a 42°S (FISCHER e PALMER, 1983). De acordo com Fancelli (2000) é considerado uma das plantas mais eficientes na conversão de energia radiante e, conseqüentemente, na produção de biomassa, visto que uma semente que pesa em média, 260 mg, resulta, em um período de tempo próximo a 140 dias, em cerca de 0,8 a 1,2 kg de biomassa e 180 a 250 g de grãos por planta, multiplicando, aproximadamente, 1.000 vezes o peso da semente que a originou.

O ciclo vegetativo do milho é bem variado, evidenciando desde genótipos extremamente precoces, cuja polinização pode ocorrer 30 dias após a emergência, até mesmo aqueles cujo ciclo vital pode alcançar 300 dias (ROMANO, 2005). Segundo Fancelli (1986), para melhor estabelecer correlações entre os elementos fisiológicos, climatológicos, fitogenéticos, entomológicos, fitopatológicos e fitotécnicos, com o desempenho da planta, o ciclo da cultura do milho deve ser dividido em 11 estádios distintos de desenvolvimento: (i) estágio 0 (da semente à emergência); (ii) estágio 1

(planta com quatro folhas totalmente desdobradas); (iii) estágio 2 (planta com oito folhas); (iv) estágio 3 (plantas com doze folhas); (v) estágio 4 (emissão do pendão); (vi) estágio 5 (florescimento e polinização); (vii) estágio 6 (grãos leitosos); (viii) estágio 7 (grãos pastosos); (ix) estágio 8 (início da formação de “dentes”, que é a concavidade na parte superior do grão); (x) estágio 9 (grãos “duros”); e (xi) estágio 10 (grãos maduros fisiologicamente).

2.1.2. O milho no Brasil

O milho é cultivado em todas as regiões geográficas do Brasil, com área plantada superior a 13,28 milhões de hectares, representando aproximadamente 27% da área plantada com grãos no país (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2011), o que deixa o país em posição de destaque na produção mundial do grão. Na safra 2010/2011 é esperada a produção de 55,61 milhões de toneladas, firmando o Brasil como terceiro maior produtor mundial, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (316,165 milhões) e da China (168 milhões) (USDA-FAS, 2011). Por sua vez, o Rio Grande do Sul deverá contribuir com aproximadamente 30% da produção de milho do Brasil nessa safra, classificando-se como o segundo maior produtor do grão no país.

Apesar do grande volume de milho produzido, quando se trata de produtividade, o Brasil ainda está longe daquelas alcançadas por países como a Itália ($9,77 \text{ t ha}^{-1}$), Canadá ($9,74 \text{ t ha}^{-1}$) e Estados Unidos ($9,59 \text{ t ha}^{-1}$) (USDA-FAS, 2011). Atualmente, a produtividade média do Brasil é de $4,185 \text{ t ha}^{-1}$ (CONAB, 2011).

Dentre os motivos para a baixa produtividade da cultura do milho no Brasil destacam-se a falta de cultivares e de manejo mais adequados as características das regiões produtoras do país. A falta de cultivares mais adequados tem sido contornada através de inúmeras pesquisas desenvolvidas para obtenção de novos genótipos de milho, destacando-se nessas pesquisas a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), através do Centro de Milho e Sorgo. Por sua vez, o clima é o fator que oferece os maiores desafios para o correto manejo da cultura, uma

vez que os demais fatores já possuem um razoável acervo de resultados de pesquisa (SILVA, 2009).

2.1.3. Efeitos do clima

O clima exerce forte influência no crescimento e desenvolvimento das plantas, e para que haja um pleno desenvolvimento, é necessário que aspectos tais como temperatura do ar, precipitação pluvial e radiação solar estejam de acordo com as exigências da cultura (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

2.1.3.1. Temperatura

A temperatura do ar é uma das variáveis que mais influenciam no desenvolvimento fenológico do milho, podendo acelerá-lo com a ocorrência de temperaturas elevadas, ou retardá-lo, com a ocorrência de temperaturas mais baixas. De acordo com Fancelli e Dourado Neto (2000) a temperatura do solo também é importante para as culturas pois durante a germinação, temperaturas do solo inferiores a 10 °C e superiores a 42 °C prejudicam sensivelmente a germinação, ao passo que aquelas situadas entre 25 e 30°C propiciam as melhores condições para o desencadeamento dos processos de germinação das sementes e emergência das plântulas.

O milho pode ser cultivado em regiões com temperaturas do ar entre 8 e 44 °C, sendo que o desenvolvimento e crescimento máximo ocorrem entre 26 e 34 °C (KINIRY, 1991). Aparentemente, não existe um limite máximo de temperatura do ar para a produção de milho (SHAW, 1977). Entretanto, a produtividade tende a diminuir com o aumento da temperatura do ar em decorrência do aumento na taxa de crescimento e diminuição na duração do período em que os grãos permanecem acumulando massa seca (MUCHOW, 1990), bem como, da redução da taxa fotossintética líquida, em função do aumento da respiração (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

2.1.3.2. Precipitação pluvial

O milho pode ser cultivado em regiões cuja precipitação pluvial varia de 300 a 5.000 mm anuais, sendo que a quantidade de água consumida por uma planta de milho durante o seu ciclo fica em torno de 600 mm (AIDRICH et al., 1982). Segundo Fancelli (2001), o milho exige cerca de 400 a 600 mm de precipitação pluvial para manifestar seu potencial produtivo sem que seja necessário o uso da irrigação. Entretanto, a quantidade de água disponível para a planta não depende somente da precipitação pluvial, mas sim da capacidade exploratória das raízes, da capacidade de armazenamento de água do solo e da magnitude do sistema radicular da planta (FANCELLI, 2003).

A deficiência hídrica é uma das principais causas de perda de rendimento em milho, exercendo efeitos variados sobre a planta, dependendo de seu estágio de desenvolvimento, do nível da deficiência e da sua duração (KUNZ et al., 2007). O principal efeito e o primeiro a se manifestar numa situação de déficit hídrico é a redução da expansão celular, pois, em condições de restrição hídrica, o limiar de turgescência ou potencial de pressão mínimo para que haja expansão pode não ser atingido, causando o enrolamento das folhas (KUNZ et al., 2007). Conseqüentemente, há redução da área foliar, diminuindo a absorção da radiação fotossinteticamente ativa e a fotossíntese da planta, o que reduz a produção de grãos (EARL e DAVIS, 2003).

O efeito do déficit hídrico, associado à produção de grãos, é particularmente importante em três estágios de desenvolvimento da planta: a) iniciação floral e desenvolvimento da inflorescência, quando o número potencial de grãos é determinado; b) período de fertilização, quando o potencial de produção é fixado; c) enchimento de grãos, quando ocorre o aumento na deposição de matéria seca, o qual está intimamente relacionado à fotossíntese, uma vez que o estresse irá resultar na menor produção de carboidratos, o que implicaria menor volume de matéria seca nos grãos (MAGALHÃES et al., 1995).

Segundo Magalhães e Durães (2006), dois dias de déficit hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, enquanto que de

quatro a oito dias diminuem em mais de 50%. Fancelli e Dourado Neto (2000) relatam que a ocorrência de deficiência hídrica de uma semana durante o florescimento masculino pode implicar numa queda de produção em torno de 50%, enquanto que após a polinização, sob as mesmas condições, as perdas chegam somente a 25%.

2.1.3.3. Radiação solar

A radiação solar incidente à superfície é de fundamental importância nos processos morfológicos e fisiológicos das plantas e seu comportamento está associado às variações da latitude, altitude, declinação solar, cobertura de nuvens e turbidez atmosférica. A maior parte da radiação solar está contida no intervalo de 0,1 a 4 μm , correspondendo às bandas do ultravioleta, visível e infravermelho, sendo que aproximadamente 41% da radiação solar que chega à superfície está compreendida na banda do visível (0,4 a 0,7 μm) variando de acordo com as condições atmosféricas (VIANELLO e ALVES, 2004). A banda do visível é a parte do espectro da radiação solar a qual as plantas utilizam para realizar a fotossíntese, sendo, por isso, denominada de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, em inglês).

Ao interagir com o dossel de uma vegetação, a radiação solar pode ser refletida, absorvida ou transmitida, podendo chegar ao interior da cobertura vegetal na forma direta, pelas clareiras, na forma difusa, por reflexão da folhagem e da superfície do solo, ou, ainda, como radiação transmitida pelas folhas (ASSUNÇÃO et al., 2008).

A interação da radiação dentro do dossel é dinâmica tanto no tempo quanto no espaço (verticalmente e horizontalmente), devido a variações temporais no ângulo de elevação solar, presença de nuvens, movimentos do dossel, variação espacial da estrutura física e capacidade fisiológica do dossel (GU et al., 2002).

Com base na lei de Bouger-Lambert é possível a determinação da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa que chega a certa altura do dossel (MONSI e SAEKI, 1953). À medida que a radiação fotossinteticamente ativa penetra no interior do dossel ela sofre uma

interceptação exponencial, sendo que o coeficiente de extinção “k” da PAR é o parâmetro adimensional da equação que retrata a rapidez com que o fluxo de radiação será atenuado pelo dossel. O “k” varia em função da forma e área das folhas, da inclinação foliar, do ângulo zenital solar, e do azimute da folha, sendo o elemento da lei de Bouger-Lambert mais crítico de ser determinado (AWAL et al., 2006).

Em se tratando de culturas agrícolas, o coeficiente de extinção também varia ao longo dos estádios fenológicos, diminuindo com o desenvolvimento da cultura, tendendo a não mais variar a partir de um determinado valor do índice de área foliar (IAF), independente da cultura estar bem irrigada ou não (MEINKE, 1996). Em culturas com folhas planófilas (leguminosas em geral) a magnitude do “k” varia entre 0,7 e 1,0, enquanto que para aquelas com folhas erectófilas (boa parte dos híbridos de milho) a variação é entre 0,3 a 0,5, em termos de valores médios (ROSENBERG et al., 1983). Conseqüentemente, para que o máximo grau de interceptação da PAR seja atingido, dosséis planófilos geralmente necessitam de menor valor de índice de área foliar do que os dosséis erectófilos (DETOMINI et al., 2008). Entretanto, o fato de determinado dossel interceptar maior quantidade de radiação fotossinteticamente ativa não conduz, necessariamente, a maior processo fotossintético por parte da cultura. Para que o processo fotossintético seja maximizado, a radiação fotossinteticamente ativa deve necessariamente ser bem distribuída ao longo do dossel, o que não ocorre em dosséis planófilos, onde a maior parte da radiação é interceptada pela camada superior do dossel, induzindo a saturação luminosa.

2.1.4. Fotossíntese e absorção de dióxido de carbono

A fotossíntese, resumidamente falando, é o processo no qual a planta utiliza energia radiante para absorver o dióxido de carbono (CO₂) e transformar em carboidratos necessários aos seus processos vitais. Ela pode ser afetada por diversos fatores, como, por exemplo, temperatura do ar, disponibilidade hídrica, quantidade de radiação fotossinteticamente ativa disponível para a planta, bem como manejo e ciclo da cultura.

Cada tipo de planta possui um valor ótimo de temperatura ambiente, no qual a fotossíntese é máxima. A ocorrência de temperaturas ambientes acima desse valor ótimo tende a reduzir a Troca Líquida do Ecossistema (NEE, em inglês), devido ao aumento da respiração da planta (FANCELLI e DOURADO NETO). Temperaturas ambientes abaixo do valor ótimo também tendem a diminuir a fotossíntese, devido a múltiplos efeitos em seu mecanismo, como, por exemplo, mudanças na estrutura de cloroplasto, redução na quantidade de clorofila, mudanças na atividade fotossintética das enzimas e fechamento estomático (BERRY e BJÖRKMAN, 1980; LARCHER e BAUER, 1981). Entretanto, os efeitos da temperatura ambiente tendem a modificar de acordo com a intensidade da radiação solar, disponibilidade de CO₂, temperatura do solo e disponibilidade hídrica.

A disponibilidade hídrica exerce forte influência na fotossíntese, e conseqüentemente, na assimilação de CO₂. A absorção desse gás ocorre através dos estômatos, por onde a planta também perde vapor d'água. Quando a planta começa a ter restrição de água, ela tende a diminuir a abertura desses órgãos, restringindo a perda de água. Entretanto, tal ação também provoca menor absorção de CO₂ e conseqüentemente, menor fotossíntese. A restrição de água causa um dilema para a planta. Caso feche demais os estômatos irá aumentar muito a sua temperatura, visto que a perda de água pela transpiração ajuda a regular a temperatura da folha. Por outro lado, se abrir demais os estômatos transpirará em demasia e ficará rapidamente sem água.

Por sua vez, a fotossíntese é fortemente relacionada à disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa, havendo aumento não linear da fotossíntese em relação à maior disponibilidade da radiação (MERCADO et al., 2009). Entretanto, Oliveira et al. (2007) citam que recentes estudos teóricos e observacionais têm demonstrado que a fotossíntese é mais eficiente sob condições de luz difusa, uma vez que a radiação fotossinteticamente ativa é melhor distribuída ao longo do dossel, diminuindo a saturação luminosa das folhas na parte superior do dossel. Gu et al. (1999), estudando a influência da nebulosidade sobre o NEE em duas florestas decíduas nos Estados Unidos da América, encontraram que a um mesmo nível de irradiância, a taxa de NEE foi maior sob condições de céu

nublado do que sob céu claro, sendo esse resultado parcialmente atribuído ao aumento na eficiência do uso da radiação. Os autores também mencionam que outros fatores podem contribuir para o aumento na taxa de NEE, como, por exemplo, a diminuição da respiração da folha e do solo, devido a menores temperaturas ambientes relacionadas a dias mais nublados.

O manejo da cultura (espaçamento entre linhas, quantidade de plantas por metro linear, disponibilidade de nutrientes) é um dos fatores que influenciam a fotossíntese mais fácil de ser controlado, porém, não menos importante. O espaçamento entre linhas e a quantidade de plantas por metro linear auxiliam na determinação do IAF da cultura, sendo que quanto maior for o espaçamento entre linhas e menor for a quantidade de plantas por metro linear, menor será o IAF, o que pode diminuir a fotossíntese, havendo menor absorção de CO₂ por área foliar, uma vez que a maioria das folhas estará mais sujeita à saturação luminosa (SINCLAIR e HORIE, 1989). Por outro lado, quando há maior adensamento de plantas, a competição por água e nutrientes aumenta e, caso não haja disponibilidade hídrica e de nutrientes suficiente para suprir a demanda da cultura, ela irá passar por déficits, o que diminuirá a produtividade.

2.1.5. Balanço de energia em superfície vegetada

O estudo do balanço de energia de uma superfície vegetada é importante para caracterizar o microclima local e identificar interações entre variáveis ambientais e a vegetação (BIUDES et al., 2009).

O balanço de energia de uma superfície vegetada pode ser determinado pela seguinte equação:

$$R_n = H + LE + G + A + F \quad (1)$$

em que R_n é o saldo de radiação, H é a densidade do fluxo de calor sensível, LE é a densidade do fluxo de calor latente, G é a densidade do fluxo de calor no solo, A é o armazenamento de energia no dossel e F é a energia utilizada para fotossíntese.

Considerando que o aproveitamento energético na fotossíntese é muito pequeno e que o armazenamento de energia no dossel pode ser considerado desprezível, devido à baixa capacidade de armazenar energia de algumas superfícies, especialmente em longos intervalos de tempo, a equação 1 pode ser aproximada para:

$$R_n = H + LE + G \quad (2)$$

Nesta equação, o saldo de radiação é particionado entre os três principais processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera: aquecimento do ar em função do H , evapotranspiração em função do LE e aquecimento do solo em função do G .

A magnitude dos fluxos H , LE e G e a forma com que a energia disponível é particionada entre essas variáveis é dependente principalmente do saldo de radiação, da disponibilidade hídrica e do tipo de vegetação. Em vegetações com boa disponibilidade hídrica a evapotranspiração consome a maior parte da energia disponível e tem uma grande influência não somente na distribuição de energia, mas também nas condições hídricas (BURBA et al., 1999). Outras variáveis que podem influenciar na evapotranspiração são a condutância estomática, a temperatura do ar, o déficit de pressão de vapor d'água e a velocidade do vento (MONTEITH, 1963, 1965; WILSON e BALDOCCHI, 2000).

Em culturas agrícolas, o balanço de energia sofre variação tanto na magnitude quanto na partição da energia utilizada por cada componente ao longo do ciclo da cultura. Durante o período de emergência, em que o solo se encontra nu, o fluxo de calor sensível tende a ser maior do que o fluxo de calor latente. Suyker e Verma (2008), em estudo experimental realizado por quatro anos em um sistema irrigado de rotação soja-milho em Nebraska, nos Estados Unidos da América, observaram que o pico do fluxo de calor sensível ao meio dia no período de emergência representava cerca de dois terços do pico do fluxo de calor latente, tanto nos dois anos em que foi cultivado com milho, quanto nos cultivados com soja. Os autores relatam ainda que um fato notável encontrado no estudo foi o rápido aumento da magnitude do fluxo de calor latente e consequente diminuição do fluxo de

calor sensível após a emergência das culturas, com o aumento do IAF. Entretanto, resultados obtidos nesse estudo sugerem um valor limite do IAF, entre 3 e 4, a partir do qual a evapotranspiração deixa de sofrer efeito direto da cobertura foliar, uma vez que a partir do fechamento completo do dossel não há aumento relativo na radiação interceptada. Para a cultura do milho, os autores encontraram valores de partição de LE/R_n variando tipicamente de 0,2 (solo nu) a 0,6 (dossel completamente fechado, $IAF > 3$). Após o fechamento completo do dossel essa razão variou de 0,6 a 0,9 até o início da senescência da cultura, em que os valores de LE/R_n diminuíram para aproximadamente 0,1 a 0,2.

Por sua vez, o fluxo de calor no solo possui um comportamento semelhante ao fluxo de calor sensível, com maiores valores ocorrendo, em geral, quando o solo se encontra com pouca cobertura vegetal. Kar e Kumar (2010), em Orissa, Índia, estudando o comportamento do balanço de energia em uma cultura de milho com estresse hídrico, encontraram valores máximos do fluxo de calor no solo no início do período vegetativo e no período de maturidade, quando a cobertura da cultura foi mínima e o solo se encontrava seco. Segundo os autores, o fluxo de calor no solo foi afetado pelo desenvolvimento do dossel da cultura, atingindo o valor mínimo quando o IAF foi máximo.

No Brasil, com o intuito de observar os fluxos atmosféricos de energia durante a fase de formação e enchimento de grãos em uma cultura de milho cultivada na Região Central do Cerrado (Planaltina, DF), FARIAS, et al. (2004), quantificaram os fluxos dos principais componentes do balanço de energia. Os autores relataram que em média, 76% do saldo de radiação foram utilizados para o fluxo de calor latente, 6% para o fluxo de calor sensível e 8% para o fluxo de calor no solo.

2.2. Técnica de Covariância de Vórtices Turbulentos

A covariância de vórtices turbulentos é uma técnica micrometeorológica que mede as trocas totais de dióxido de carbono (CO_2), calor sensível e latente no ecossistema. No início, essa técnica era utilizada para medir

apenas fluxos de calor latente, de calor sensível e de momentum. Mas, a partir de 1990, sensores de análises de resposta rápida da concentração de CO₂ começaram a ser disponibilizados e vários centros técnico-científicos desenvolveram sistemas de medidas de fluxos de CO₂, os quais têm sido amplamente utilizados em estudos observacionais da troca de CO₂ entre os ecossistemas e a atmosfera (GRACE, 2004).

A técnica de covariância de vórtices turbulentos é mais precisa quando as condições atmosféricas (vento, temperatura e umidade do ar, e CO₂) são contínuas, a vegetação é homogênea e está localizada em um terreno plano (BALDOCCHI, 2003), o que nem sempre é encontrado em condições naturais. De acordo com Moncrieff et al. (1996), o não atendimento dessas características pode causar erros sistemáticos nas medidas e, conseqüentemente, na interpretação da correlação dos vórtices turbulentos, os quais tendem a aumentar quando integrados ao longo do tempo para produzir somas diárias e anuais. Nesse sentido desde a década de 80, Baldochi et al., (1988) já afirmavam serem necessárias algumas correções matemáticas para minimizar erros encontrados nas medidas de fluxos turbulentos.

Para que os fluxos de calor sensível e calor latente sejam representativos da cultura que está sendo estudada, os sensores que serão utilizados devem ser instalados dentro da camada limite superficial, conhecida também como camada de fluxo constante, onde o fluxo é praticamente constante com a altura (MONCRIEFF et al., 1996). Essa camada representa apenas 10% da camada limite interna e sua espessura varia dependendo da velocidade do vento, da rugosidade da superfície e do regime de turbulência presente.

A altura da camada limite interna é determinada em função da altura da vegetação e pela distância entre o ponto de coleta dos dados e a extremidade em que a vegetação estudada deixa de ser homogênea (bordadura, ou *fetch* em inglês). Quanto maior for a bordadura e a altura da vegetação estudada, maior será a camada limite interna, e conseqüentemente, maior será a altura em que os sensores poderão ser instalados.

Na Figura 1 está representada a formação da camada limite quando há transição de uma cobertura da superfície para outra, e à medida que a massa de ar se desloca de um tipo de superfície para outro, cria-se uma camada limite interna que aumenta em altura e distancia à medida que o ar se afasta da fonte de origem.

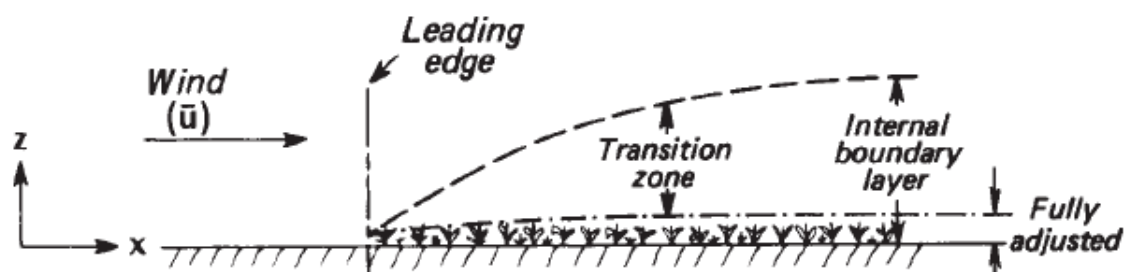


Figura 1. Representação da camada limite em uma superfície com cobertura descontínua.

Fonte: Oke (1987).

Portanto, a determinação da altura em que os sensores serão instalados é muito importante para que os métodos utilizados possam ser aplicados de forma satisfatória, reduzindo erros nas estimativas, principalmente com relação ao efeito advectivo.

Estudos sobre a razão entre a altura de medição e a bordadura mostram que essa razão pode variar de acordo com as condições atmosféricas e com a transição de cobertura da superfície. Kaimal e Finnigan (1994) relatam que em condições estáveis a razão de 1:100 (altura por bordadura, em metros), frequentemente utilizada, precisa ser aumentada, enquanto que sob condições instáveis ela pode ser menor. Monteith e Unsworth (1990) citam que à medida que ocorre a transição de uma superfície menos rugosa para outra mais rugosa o uso de uma razão de 1:20 (altura por distância) é adequado, enquanto que quando há a transição de uma superfície mais rugosa para uma menos rugosa, os autores sugerem uma razão de 1:70, para que os sensores encontrem-se dentro da camada de equilíbrio. Já Rosemberg et al. (1983) sugerem que ao se trabalhar com culturas agrícolas, se use a razão de 1:100 para garantir que as áreas adjacentes não interfiram nas medidas, e que os perfis encontrem-se dentro da camada limite de equilíbrio.

Entretanto, em estudos micrometeorológicos sobre culturas agrícolas geralmente as bordaduras não são muito extensas, tornando necessária a instalação dos sensores mais próximos do dossel da cultura, o que também pode contribuir para erros nas medidas. Savege et al. (1995) relataram que se a altura de instalação do anemômetro sônico é muito próxima da superfície do dossel da planta, pequenos vórtices podem não ser detectados pelos sensores, incorrendo na subestimativa do fluxo de calor sensível. Para evitar esse tipo de erro, os instrumentos devem ser instalados a certa altura, de tal modo que à medida que a planta cresça, esses sensores não fiquem tão próximos da cobertura vegetal a ponto de gerar erros, tornando-se assim as medidas bem representativas das características da vegetação estudada.

Adicionalmente, estudos também têm mostrado que a técnica de covariância de vórtices turbulentos subestima as trocas líquidas de CO₂ no ecossistema (BALDOCCHI, 2003). Um dos motivos é que as condições noturnas frequentemente não são condizentes com a hipótese de transporte turbulento assumida pela técnica. Entretanto, Goulden et al. (1996) relatam que, apesar de apresentarem limitações importantes, especialmente em condições de estabilidade atmosférica, o sistema de covariância de vórtices turbulentos permite avaliar com suficiente confiança os fluxos de massa e energia.

2.2.1. O filtro u^*

Na tentativa de minimizar perdas nas medidas noturnas de CO₂, devido à baixa turbulência nesse período, pesquisadores costumam efetuar correção nos dados de fluxo de dióxido de carbono usando a velocidade de fricção do ar (u^*) como um indicador (ARAÚJO et al., 2002, PRIANTE FILHO et al., 2004, VOURLITIS, et al., 2004). Este valor é frequentemente determinado visualmente, examinando a regressão entre os valores noturnos do fluxo de CO₂ e de u^* , a partir do qual, avaliam se há redução destes valores em condições de pequenos valores de u^* (pouca turbulência mecânica) e, em caso positivo, filtram os dados e substituem por alguma forma de preenchimento dos mesmos, como, por exemplo, através de relações empíricas estabelecidas entre os fluxos de CO₂ e a radiação

fotossinteticamente ativa (durante o dia) e os fluxos de CO₂ e a temperatura do solo a 10 cm de profundidade no período noturno (GOULDEN et al., 1996).

Gu et al. (2005) relatam que o valor encontrado da velocidade de fricção do ar dependerá da distribuição da área foliar, da altura do dossel e também das condições meteorológicas reinantes e das características do terreno. Segundo Baldocchi (2003) o valor de u^* que produz “bons” fluxos noturnos de CO₂ não é universal. Em geral, em estudos sobre culturas agrícolas o valor mínimo de u^* que gera “bons” fluxos noturnos é de 0,17 m.s⁻¹ (GOULDEN et al., 1996).

Embora algumas perdas nos fluxos sejam inevitáveis, existe uma variedade de métodos que podem ser usados para corrigir as medidas de fluxos ou minimizar as perdas nos fluxos fazendo uso de um rigoroso modelo experimental (MASSMAN, 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo e Tratos Culturais

O presente trabalho foi realizado no sítio experimental pertencente à Rede SULFLUX, situado na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa (FUNDACEP) (28°36' S; 53°40' O; 409 m de altitude), localizada no município de Cruz Alta, no Estado do Rio Grande do Sul (Figura 2).

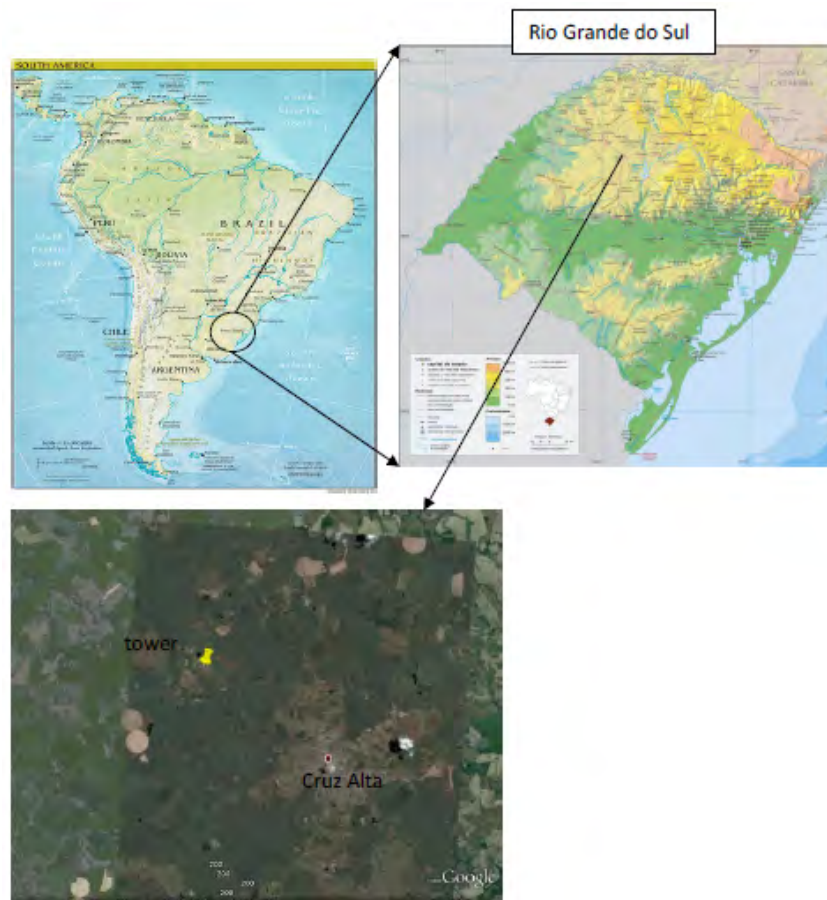


Figura 2. Localização do sítio experimental.

A parcela cultivada com milho possui uma área de 40 metros de largura por 60 metros de comprimento. Essa parcela vem sendo cultivada sob a forma de plantio direto por mais de 25 anos, havendo rotação de culturas (soja, milho e trigo). O milho utilizado no experimento foi o Híbrido Simples FUNDACEP PIONEIRO de Ciclo Precoce, com alto potencial produtivo e com média de 74 dias entre o período da emergência ao florescimento. O milho foi semeado no dia 20 de outubro de 2010 e colhido no dia 10 de março. A largura entre as linhas adotada foi de 70 cm, com distância média de 20 cm entre cada planta na mesma linha.

Com relação à adubação da cultura do milho, devido aos teores de fósforo e potássio no solo estarem relativamente altos, foi utilizado a dose de 50 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg.ha⁻¹ de K₂O, aplicado a lanço em superfície no período de inverno. Foi aplicado como fonte de fertilizante fosfatado e potássico, respectivamente, superfosfato triplo (46% P₂O₅) e o cloreto de potássio (60% K₂O). Quanto a adubação nitrogenada, utilizou-se a uréia (45% N) como fonte de fertilizante nitrogenado, sendo aplicada à lanço na superfície do solo, nas doses de 150 e 200 kg.ha⁻¹, respectivamente em 23/10/2010 e 10/11/2010.

O controle de plantas daninhas foi realizado com o uso dos herbicidas Atrazinax 500 (Atrazine) + Sanson 40 SC (Nicosulfuron) nas doses de 5,0+0,8 l.ha⁻¹ do produto comercial. No controle de pragas foram utilizados os inseticidas Match EC (Lufenurom) + Karate Zeon 250 CS (Lambda-cialotrina), nas doses de 300+100 ml.ha⁻¹ de produto comercial, respectivamente.

3.2. Aquisição dos Dados

3.2.1. Variáveis meteorológicas e do solo

Foram realizadas medições contínuas no período de 11 de novembro de 2010 a 19 de fevereiro de 2011 de irradiância solar global refletida (S_{out}); radiação fotossinteticamente ativa incidente na base do dossel (PAR_{inb}) e

radiação fotossinteticamente ativa refletida (PAR_{out}); temperatura do ar (T) e umidade relativa do ar (UR) e temperatura do solo (T_s). Os sensores foram conectados a um *datalogger* modelo CR23X, fabricado pela Campbell Scientific Instrument, Utah, USA, e as medidas foram realizadas a cada segundo e armazenadas médias a cada minuto.

Além dessas medidas foram realizadas medições no mesmo período de irradiância solar global incidente (S_{in}) e radiação fotossinteticamente ativa incidente acima da cultura (PAR_{in}), saldo de radiação (R_n) e umidade volumétrica do solo na camada de 0 à 30 cm de profundidade. As leituras dos sensores foram realizadas na velocidade de 10 Hz, sendo armazenadas médias a cada 30 minutos em um *datalogger* CR1000, também fabricado pela Campbell Scientific Instrument, e instalado na mesma torre em que se encontravam os sensores conectados ao *datalogger* CR23X.

Devido à ausência de registros da precipitação pluvial na parcela de estudo, foram utilizados os dados de precipitação pluvial coletados pela torre de superfície automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada a aproximadamente 300 m da parcela de estudo.

Na Figura 3 são apresentados os instrumentos instalados na torre micrometeorológica localizada na parcela de estudo. As alturas de instalação dos sensores são apresentadas na Tabela 1.

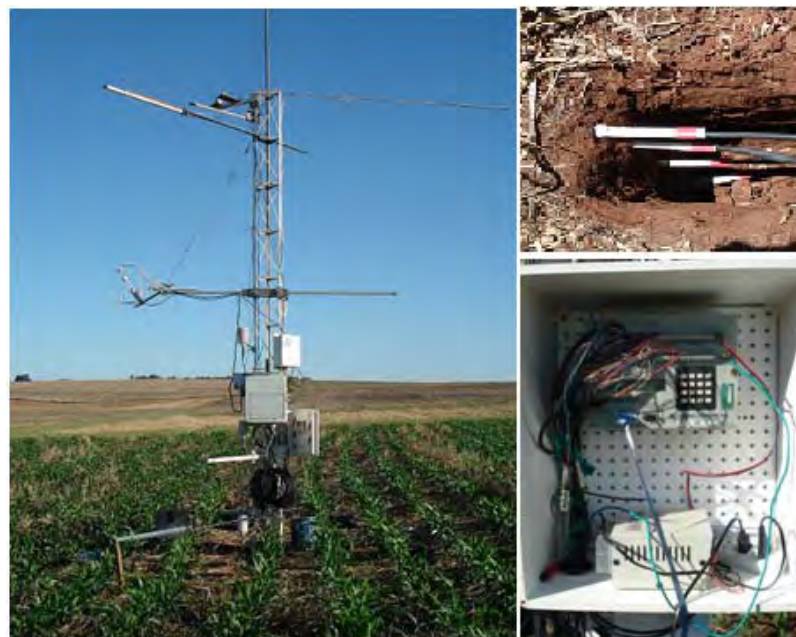


Figura 3. Torre micrometeorológica e instrumentos utilizados na parcela experimental.

Tabela 1. Variáveis meteorológicas mensuradas, instrumentos utilizados e suas respectivas alturas de instalação

Variável Meteorológica	Instrumento	Altura
Acima do dossel		
Irradiância solar global incidente e refletida	Piranômetro LI-COR (LI-200SA)	4,55 m
Radiação fotossinteticamente ativa incidente	Sensor Quantum LI-COR (LI191SA)	4,80 m
Radiação fotossinteticamente ativa refletida	Sensor Quantum LI-COR (LI191SA)	4,55 m
Temperatura e umidade relativa do ar	Termohigrômetro Vaisala (HMP45C)	2,30 m
Saldo de Radiação	Saldo radiômetro Kipp & Zonen (NR-LITE-L)	4,80 m
No interior do dossel		
Radiação fotossinteticamente ativa incidente	Quantum LI-COR (LI191SA)	0,40 m
No interior do solo		
Temperatura	Termopar (modelo 107)	10 cm
Umidade volumétrica do solo	Sonda helicoidal TDR (Time Domain Reflectometry)	30 cm

3.2.2. Instrumentos e métodos utilizados na determinação dos fluxos de massa e energia

Medições de fluxos de dióxido de carbono (CO_2), calor latente (LE) e calor sensível (H) foram realizadas no período de 11 de novembro de 2010 a 19 de fevereiro de 2011 utilizando a técnica micrometeorológica de covariância de vórtices turbulentos (Eddy Covariance, em inglês). O sistema de Eddy Covariance (Figura 4) foi constituído de um analisador de gás por infravermelho de caminho aberto (LI-7500), fabricado pela LI-COR Inc., que media as concentrações de CO_2 e vapor d'água (H_2O), e um anemômetro sônico (CSAT3 3-D), fabricado pela Campbell Scientific Instrument, que

media as velocidades e direção do vento em três dimensões (u , v , w). Ambos os sensores foram instalados a 2,5 metros de altura da superfície.

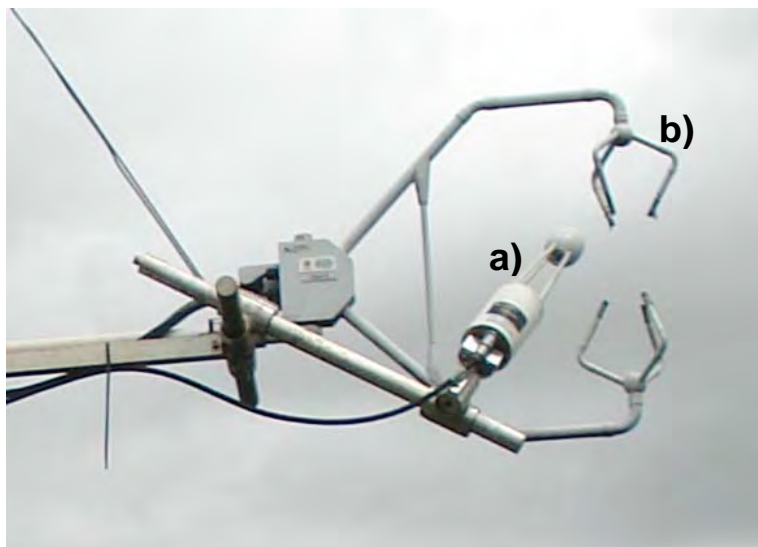


Figura 4. Analisador de gás por infravermelho LI-7500 (a) e anemômetro sônico CSAT3 3-D (b).

O fluxo de calor no solo (G) foi medido a profundidade de 2 cm, através do sensor de termopilha HFP01, fabricado pela Campbell Scientific Instrument. As leituras dos dois sensores foram realizadas na velocidade de 10 Hz, sendo armazenadas médias a cada 30 minutos em um datalogger CR1000, também fabricado pela Campbell Scientific Instrument. Devido ao grande volume de dados produzido pelo sistema de Eddy Covariance, o datalogger CR1000 foi conectado a um computador, onde eram descarregados os dados a cada dois minutos.

Após coleta periódica realizada a cada 15 dias, os dados eram processados através de rotina desenvolvida por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Maria escrita em linguagem Fortran 90.

3.2.2.1. Cálculo dos fluxos turbulentos

A técnica de Eddy Covariance é um princípio de determinação direta dos fluxos, que calcula a correlação entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com os desvios temporais da velocidade do vento horizontal (fluxo de momentum), da temperatura do ar (fluxo de calor sensível), da umidade do ar (fluxo de calor latente) e da

concentração de CO₂ (fotossíntese, respiração e fotorrespiração). O fluxo de uma grandeza escalar c pode ser escrito como:

$$F_c = \overline{w\rho_c} \quad (3)$$

em que w é a velocidade vertical do vento, ρ_c é a concentração do escalar c , e a barra horizontal sobreposta ao produto destas variáveis representa a média temporal em um determinado intervalo de tempo. Entretanto, devido à grande quantidade de flutuações observadas nas medidas de velocidade do vento, temperatura do ar e concentração dos gases, comumente essas variáveis são expressas como a soma de uma componente média (\overline{w} , $\overline{\rho_c}$) e outra flutuante (w' , ρ_c') (BALDOCHI et al., 1988; MONCRIEFF et al., 1997). Este procedimento é conhecido como decomposição de Reynolds.

Aplicando esse procedimento às variáveis w e ρ_c obtém-se:

$$w = \overline{w} + w' \quad (4)$$

$$\rho_c = \overline{\rho_c} + \rho_c' \quad (5)$$

em que \overline{w} é o valor médio da velocidade vertical do vento, $\overline{\rho_c}$ é o valor médio da concentração da escalar c e w' e ρ_c' representam as flutuações em relação à média das suas respectivas componentes.

Retornando a Equação 3 e substituindo as Equações 4 e 5, tem-se:

$$F_c = \overline{(\overline{w} + w')(\overline{\rho_c} + \rho_c')} \quad (6)$$

Desenvolvendo a Equação 6, obtém-se:

$$F_c = \overline{w\rho_c} + \overline{w\rho_c'} + \overline{w'\rho_c} + \overline{w'\rho_c'} \quad (7)$$

Como pela lei da conservação de massa a média da velocidade vertical do vento w é nula, e os termos que têm apenas um componente flutuante, por definição, também têm a média de todas as suas flutuações nula, o fluxo turbulento de uma grandeza escalar c pode ser escrita como:

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} \quad (8)$$

em que w' representa a variação da componente vertical da velocidade do vento em relação à sua média, ρ_c' representa a variação da concentração do escalar c em relação à sua média, e a barra horizontal sobre o produto dos desvios caracteriza a covariância entre w' e ρ_c' .

Desta forma, os fluxos turbulentos de calor latente, calor sensível e CO_2 , podem ser respectivamente expressos da seguinte forma:

$$LE = \rho \lambda \overline{w'q'} \quad (9)$$

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad (10)$$

$$E_c = \rho w' \overline{C'} \quad (11)$$

em que q é a umidade específica do ar, T é a temperatura do ar, C é a concentração de CO_2 , c_p é o calor específico do ar à pressão constante, ρ é a densidade do ar seco e λ é o calor latente de evaporação.

3.2.2.2. Método para medir a acurácia dos fluxos de energia

Visando aumentar a confiabilidade nos dados, a exatidão das medidas de fluxos de energia realizadas pelo método de covariância de vórtices turbulentos pode ser avaliada a partir do cálculo do fechamento do balanço de energia segundo (MONCRIEFF et al., 1997; TWINE et al., 2000), da seguinte forma:

$$H + LE = R_n - G \quad (12)$$

em que H é o fluxo de calor sensível (W.m^{-2}), LE é o fluxo de calor latente (W.m^{-2}), R_n é o saldo de radiação (W.m^{-2}) e G é o fluxo de calor no solo (W.m^{-2}).

3.2.2.3. Preenchimento de falhas

Para o preenchimento de dados horários de fluxos de CO_2 , calor sensível e calor latente que tenham sido perdidos devido a quedas de

energia, mau funcionamento dos sensores ou que tenham sido filtrados das séries de dados, foram utilizadas as metodologias aplicadas por Suyker et al. (2003) e Suyker e Verma (2010). Durante o dia, o fluxo de CO₂ foi estimado como uma função da radiação fotossinteticamente ativa incidente, enquanto que à noite o fluxo de CO₂ foi estimado como uma função da temperatura do solo a 10 cm de profundidade. Os fluxos de calor sensível e latente tanto durante o dia quanto a noite foram estimados através do saldo de radiação. Os preenchimentos nos dados de fluxos foram realizados apenas em dias que faltavam no máximo duas horas de dados no período diurno ou seis horas no período noturno.

3.2.3. Medições fenológicas e índices fisiológicos

Durante o ciclo da cultura foram realizadas avaliações para caracterização dos estádios vegetativos, reprodutivo e de formação de grãos baseadas na escala de Fancelli (1986).

Para medir a área foliar foi utilizado o integrador de área foliar LI3000A, fabricado pela LI-COR Inc. Foram escolhidas cinco plantas aleatoriamente para representar a área foliar da cultura durante todo o ciclo, sendo que a área foliar média para uma planta foi obtida a partir da média das cinco plantas. Ao longo do ciclo da cultura foram realizadas oito medições da área foliar, com periodicidade média de 15 dias.

O índice de área foliar foi determinado através da equação abaixo:

$$IAF = \frac{AF}{S} \quad (13)$$

em que AF é a área foliar média para uma planta (m²) e S a área da superfície média ocupada por uma planta (m²), neste caso (0,70 x 0,20 m).

3.3. Estimativas de Variáveis

A pressão de saturação do vapor d'água (e_s , em hPa), foi calculada a partir da equação de Tetens (1930) para temperatura do ar maior ou igual a

0 °C de acordo com a equação abaixo:

$$e_s = 6,1078 \times 10^{\frac{7.45}{237.3 + t}} \quad (14)$$

em que t é a temperatura média do ar (°C).

A pressão atual do vapor d'água (e, em hPa) foi calculada com base na equação a seguir:

$$e = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (15)$$

em que UR é a umidade relativa (%).

A radiação solar extraterrestre (R_o) diária e a cada 30 minutos foi estimada usando a relação geométrica Terra-Sol (Iqbal, 1983) e a constante solar média 1.367 W.m^{-2} .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Fenologia da Cultura

O ciclo da cultura do milho foi dividido em 11 estádios fenológicos, desde a emergência, ocorrida no dia 09 de outubro de 2010, até a maturação fisiológica do grão (estádio R6), no dia 02 de março de 2011 (Tabela 2). Visando estabelecer correlações entre o desempenho da cultura com os fatores ambientais, dividiu-se ainda o ciclo da cultura em quatro períodos importantes do ponto de vista agrônomo, seguindo a mesma metodologia adotada por Silva (2009). O primeiro período (P1) corresponde ao período da semeadura até o estágio V11. Nesse período são definidos o potencial de produção e o número de fileiras nas espigas. Entretanto, deve-se salientar que não foram realizadas coletas de dados nos primeiros 31 dias após a emergência (DAE), ficando o período (P1) condicionado ao intervalo entre o final do estágio V3 e o início do estágio V12. No segundo período (P2), compreendido entre os estádios V12 e VT, é definido o tamanho da espiga e o máximo acúmulo de matéria seca pela planta. O terceiro período (P3) corresponde aos estádios R1 e R2, em que, juntamente com o período anterior, define o número de grãos e inicia o acúmulo de amido no endosperma dos grãos. Finalmente, no quarto período (P4), compreendido entre os estádios R3 e R6, é definida a densidade do grão.

Tabela 2. Estádios fenológicos da cultura do milho

Estádio	Característica	Data	DAE	Período
VE	Emergência	09/10/2010	0	
V4	Quatro folhas	13/11/2010	35	P1
V8	Oito folhas	29/11/2010	51	
V12	Doze folhas	10/12/2010	62	P2
VT	Pendoamento	16/12/2010	68	
R1	Embonecamento	24/12/2010	76	P3
R2	Bolha d'água	08/01/2011	91	
R3	Grão leitoso	15/01/2011	98	
R4	Grão pastoso	21/01/2011	104	P4
R5	Formação de dentes	03/02/2011	117	
R6	Maturação fisiológica do grão	02/03/2011	144	

A evolução do IAF ao longo do ciclo da cultura (Figura 5) seguiu o padrão característico de culturas anuais, com uma fase inicial de crescimento lento da emergência até o estágio V4 (35 DAE), atingindo o valor de $0,57 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, seguida de uma fase de rápido crescimento, de V4 até V12 (62 DAE), obtendo um IAF de $3,47 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$. A cultura atingiu o IAF máximo aos 90 DAE, com valor de $4,43 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, que está dentro dos valores esperados para esse cultivar, o qual varia entre 4 e $5 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, dependendo do adensamento de plantas. Após o estágio R3 (98 DAE), houve acentuada diminuição do IAF (apenas folhas verdes) devido à senescência foliar. Para a obtenção do IAF diário foram ajustadas duas equações ao longo do ciclo da cultura: uma sigmoideal com cinco parâmetros até aos 89 DAE, que obteve um coeficiente de determinação (r^2) de 0,99; e outra polinomial de terceira ordem utilizada a partir de 90 DAE até o final do ciclo da cultura, cujo coeficiente de determinação foi aproximadamente 1,00.

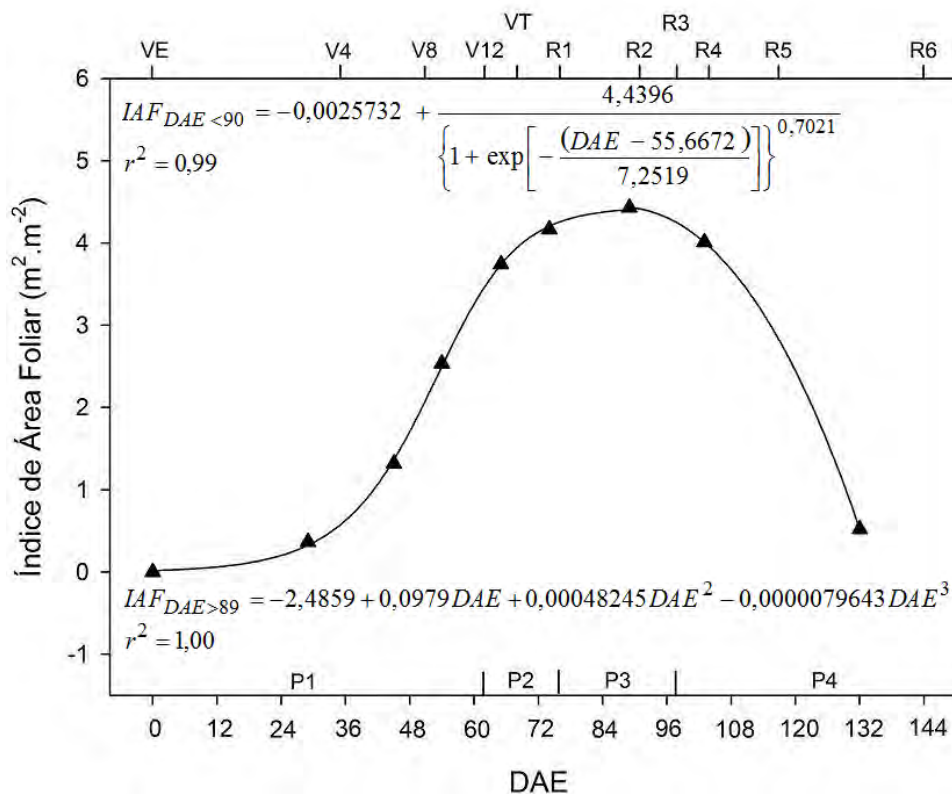


Figura 5. Valores de índice de área foliar ao longo do ciclo da cultura.

4.2. Variáveis Meteorológicas

4.2.1. Normais climatológicas

A precipitação pluvial (E-Prec), uma das variáveis meteorológicas que mais causa quebras de safras no Rio Grande do Sul, foi em média 45% inferior à normal climatológica (N-Prec) nos meses de outubro, novembro e janeiro (Figura 6), devido à influência do fenômeno La Niña, o qual tende a diminuir a precipitação pluvial na Região Sul do país. Entretanto, nos meses de dezembro e fevereiro a precipitação pluvial foi cerca de 21 e 155% superiores à normal climatológica, respectivamente. Devido à elevada precipitação pluvial no mês de fevereiro, o total pluviométrico de outubro até o final de fevereiro foi de apenas 2% superior à normal climatológica para o período.

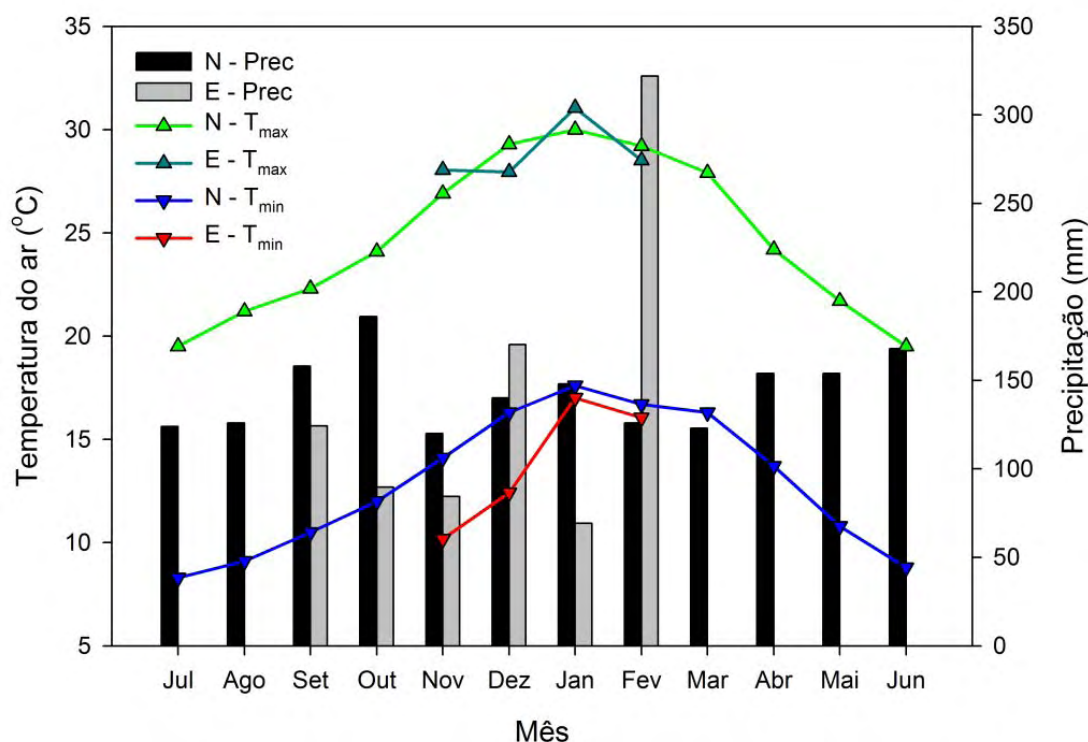


Figura 6. Ciclo anual da precipitação pluvial (Prec) e temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) do ar, sendo que “N” refere-se aos valores das normais climatológicas e “E” aos valores do período experimental.

A temperatura máxima do ar no período do experimento ($E-T_{max}$) apresentou valores superiores aos da normal climatológica ($N-T_{max}$) nos meses de novembro e janeiro, provavelmente devido à precipitação pluvial ter sido inferior à normal climatológica nesses meses. Por outro lado, quando a precipitação pluvial foi superior à normal climatológica (dezembro e fevereiro), a temperatura máxima do ar foi inferior. Por sua vez, a temperatura mínima do ar no período do experimento ($E-T_{min}$) foi sempre inferior aos valores da normal climatológica ($N-T_{min}$), com diferenças maiores ocorrendo nos meses de novembro e dezembro, possivelmente influenciadas pela chegada de algumas massas de ar frio.

4.2.2. Variabilidade diária

A precipitação pluvial foi bem distribuída ao longo do ciclo da cultura (Figura 7), com um total de 735 mm, sendo esse valor superior às

necessidades hídricas do milho, que segundo Fancelli (2001) varia entre 400 e 600 mm. No período P3, quando a planta iniciou a formação e enchimento de grãos, sendo altamente sensível à restrição hídrica, houve pouca precipitação pluvial, cerca de $1,45 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Tabela 3), sendo esse o período que apresentou menor média diária de precipitação pluvial ao longo do experimento. Entretanto, a precipitação pluvial de $9,9 \text{ mm.dia}^{-1}$ ocorrida no período anterior (P2) contribuiu para que a umidade do solo (U_{SOLO}) não diminuísse a ponto de causar grande restrição hídrica à planta, tendo apresentado no período P3 valor médio de $0,35 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, que corresponde aproximadamente a 106% superior ao ponto de murcha permanente (PMP), que é de $0,17 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (comunicação pessoal da equipe). Nos períodos P1 e P4 a precipitação pluvial apresentou valores médios diários de 3,26 e 7,71 mm.dia^{-1} , respectivamente. Por sua vez, os valores médios da umidade do solo foram de $0,42 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (P1), $0,43 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (P2) e $0,37 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (P4).

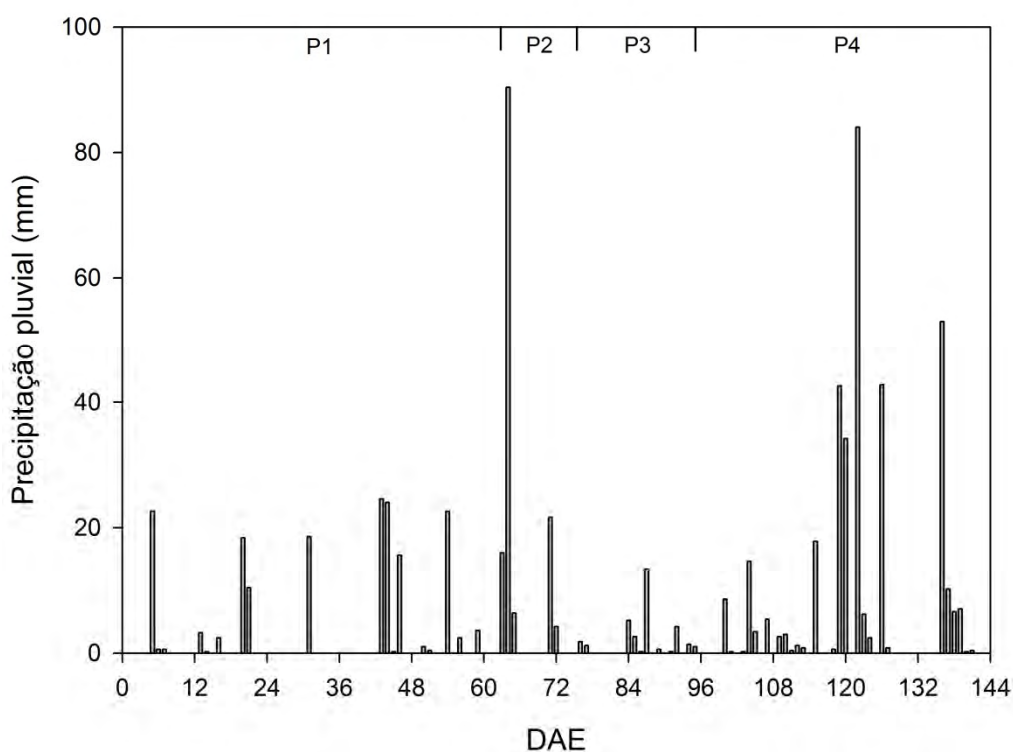


Figura 7. Precipitação pluvial ao longo do ciclo da cultura.

Tabela 3. Precipitação pluvial e umidade do solo ao longo do ciclo da cultura

Período	Precipitação (mm.dia ⁻¹)	U _{Solo} (m ³ .m ⁻³)
P1	3,26	0,42
P2	9,90	0,43
P3	1,45	0,35
P4	7,71	0,37

A umidade do solo, em se tratando de valores médios diários, apresentou um valor máximo de 0,48 m³.m⁻³ aos 44 DAE (Figura 8), enquanto que o mínimo ocorreu aos 103 DAE (0,29 m³.m⁻³), no final do estágio R3 (início do período P4), momento em que está ocorrendo a translocação de fotoassimilados presentes nas folhas e colmos para a espiga e o grão, bem como a transformação dos açúcares em amido (MAGALHÃES et al., 2002).

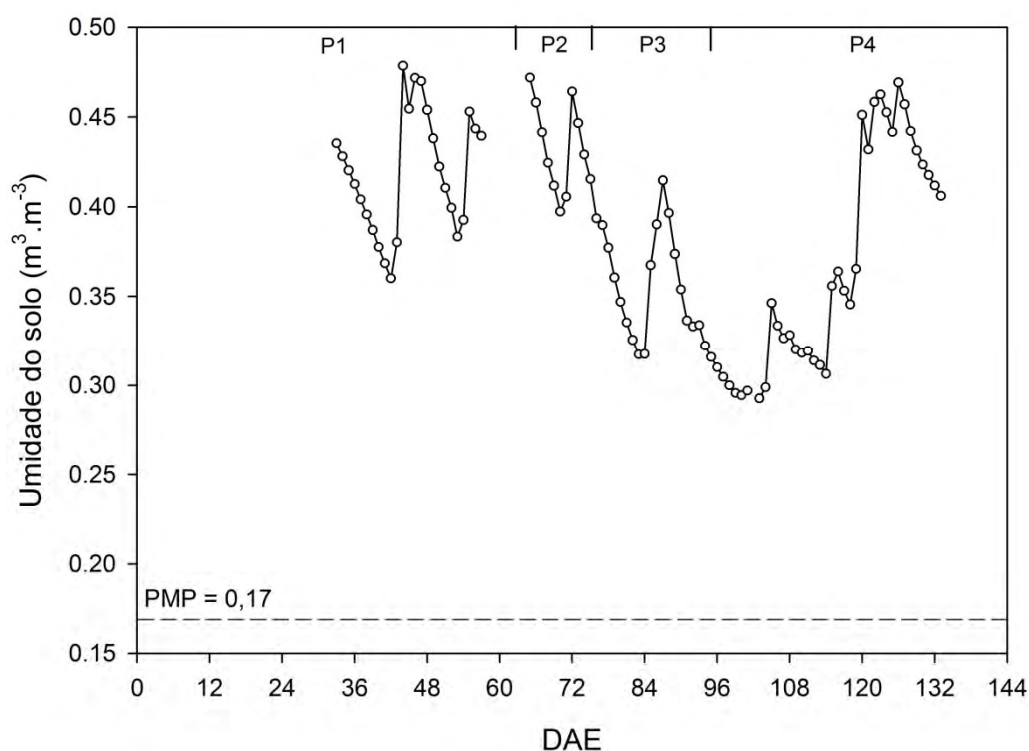


Figura 8. Umidade do solo e ponto de murcha permanente (PMP) ao longo do ciclo da cultura.

A temperatura média do ar (T_{med}) variou entre 17,4 (34 DAE) e 26,9 °C (91 DAE) (Figura 9), com valores médios de 21,8 °C (P1), 24,3 °C (P3) e 24,0 °C (P4) (Tabela 4). Devido a falhas no datalogger CR23X, equipamento utilizado no armazenamento dos dados de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar refletida, radiação fotossinteticamente ativa incidente na base do dossel e refletida pela cultura, bem como temperatura do solo, foram coletados dados dessas variáveis apenas nos três primeiros dias do período P2. Uma vez que os valores referentes a esses poucos dias de dados coletados não representam o período P2, esses dados não foram apresentados nos resultados.

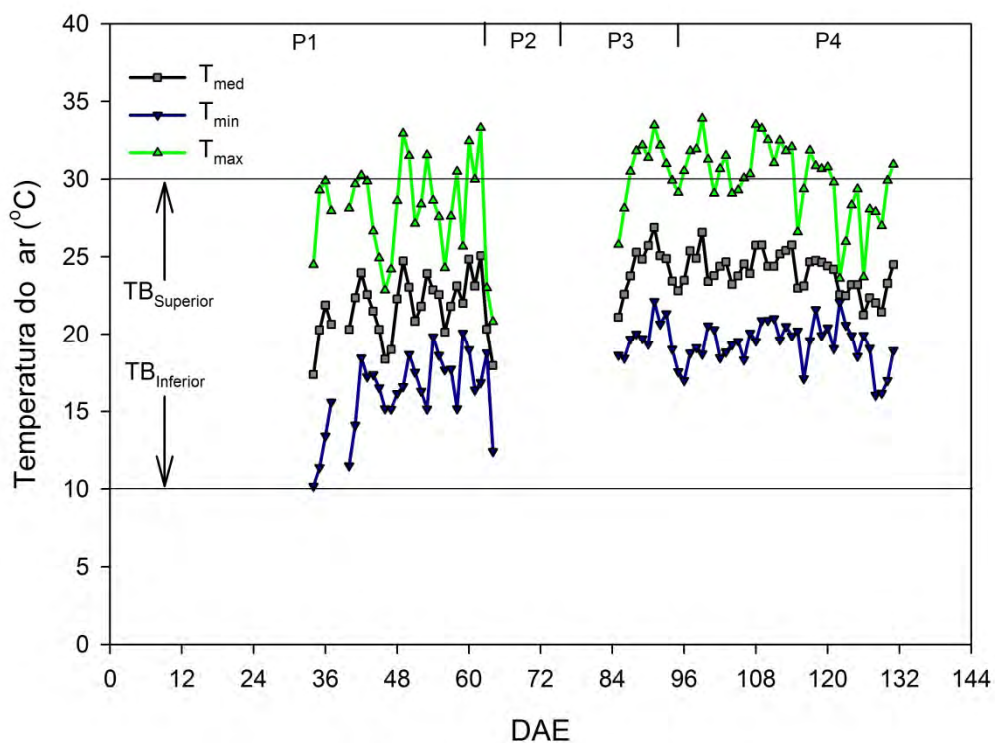


Figura 9. Temperaturas média (T_{med}), mínima (T_{min}) e máxima (T_{max}) do ar ao longo do ciclo da cultura.

Tabela 4. Temperaturas média (T_{med}), mínima (T_{min}) e máxima (T_{max}) do ar, pressão de saturação do vapor d'água (e_s), pressão atual de vapor d'água (e) e déficit de pressão de vapor (Δe)

Período	T_{med} (°C)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	e_s (hPa)	e (hPa)	Δe (hPa)
P1	21,8	28,3	16,2	27,00	16,74	10,26
P2	-	-	-	-	-	-
P3	24,3	30,6	19,4	31,16	22,87	8,29
P4	24,0	30,0	19,5	30,51	23,54	6,96

A temperatura mínima do ar variou de 10,2 °C (34 DAE) a 22,1 °C (91 DAE), enquanto que a temperatura máxima do ar (T_{max}) obteve valor mínimo (20,8 °C) aos 64 DAE e máximo (33,9 °C) aos 99 DAE, sendo sempre inferior a 34 °C, limite máximo considerado por Kiniry (1991) para que o desenvolvimento e o crescimento da cultura sejam máximos. A temperatura média do ar esteve frequentemente acima de 10 °C, temperatura base inferior ($T_{B_{inferior}}$), que é a temperatura mínima necessária para que a cultura passe a adquirir assimilados, bem como manteve-se abaixo da temperatura base superior ($T_{B_{superior}}$), que é de 30 °C, acima da qual ocorre redução na produtividade.

O valor médio da temperatura máxima do ar no período P3 foi de 30,6 °C (Tabela 4), sendo esse período o que apresentou os maiores valores da T_{max} . Apesar de no período P3 ocorrerem os maiores valores de temperatura máxima do ar e a menor média diária de precipitação pluvial, a média da pressão de vapor (e) nesse período foi superior a do período P1, o que sugere que a precipitação pluvial no período P2 contribuiu para que a umidade do solo não tivesse reduzido drasticamente.

O déficit de pressão de vapor (Δe) variou muito ao longo do ciclo da cultura, de 1,65 aos 64 DAE a 16,94 hPa aos 41 DAE (Figura 10). Em média, o Δe foi maior no período P1 (10,26 hPa) (Tabela 4), quando o solo se encontrava mais exposto, com menor cobertura vegetal, embora houvesse maior precipitação pluvial nesse período em relação ao período P3. Por outro lado, o déficit de pressão de vapor foi menor no período P4

(6,96 hPa), provavelmente devido ao fato da precipitação pluvial ter sido melhor distribuída nesse período.

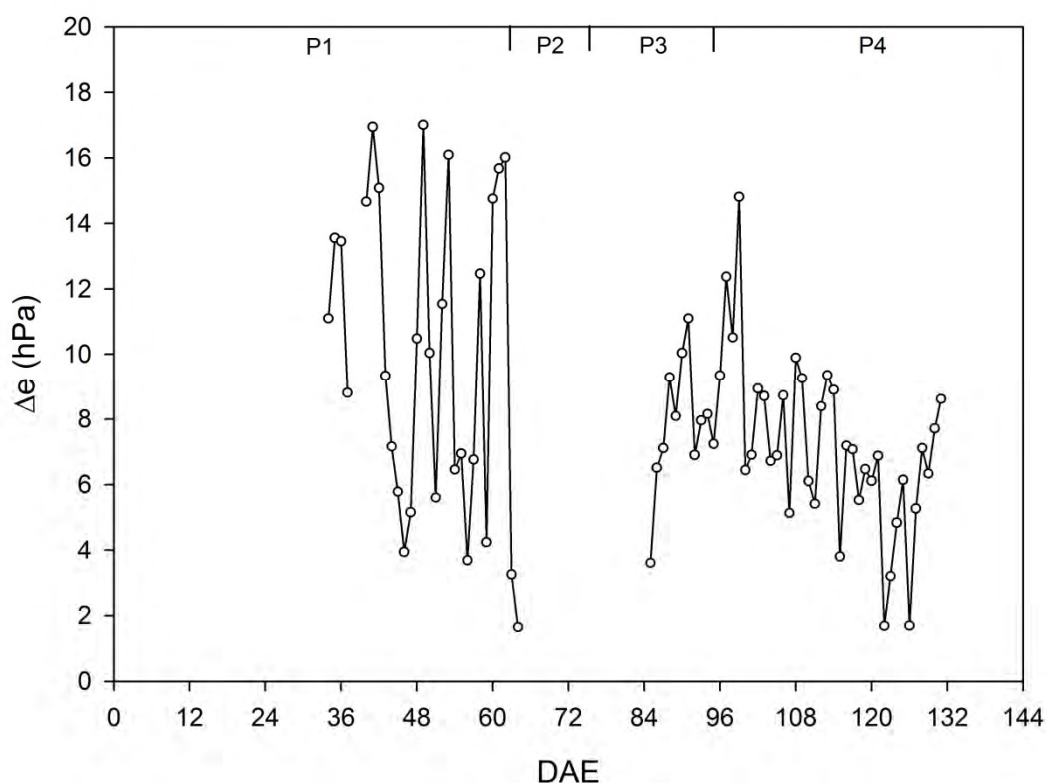


Figura 10. Déficit de pressão de vapor (Δe) ao longo do ciclo da cultura.

A irradiância solar incidente (S_{in}) variou de $3,47 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (63 DAE) a $33,76 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (66 DAE) ao longo do ciclo da cultura (Figura 11). Em termos médios, houve progressivo aumento da S_{in} do período P1 ($24,27 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) até o período P3 ($26,14 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), seguido de diminuição no período P4 ($22,70 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) (Tabela 5). Essa variabilidade da S_{in} está relacionada com a quantidade de cobertura de nuvens, uma vez que quanto maior for a cobertura de nuvens, menor será a quantidade de irradiância solar global que chega à superfície, como pode ser comprovado por meio dos valores do índice de claridade (k_t - razão entre a irradiância solar à superfície e a radiação solar extraterrestre). Quanto maior for o k_t , menor será a cobertura de nuvens. Devido a relação praticamente linear existente entre a S_{in} e a radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}), o comportamento da PAR_{in} foi semelhante ao da S_{in} (Figura 11), com valores médios de $10,89 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (P1), $11,11 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (P2), $11,51 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (P3) e $9,75 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (P4) (Tabela 5).

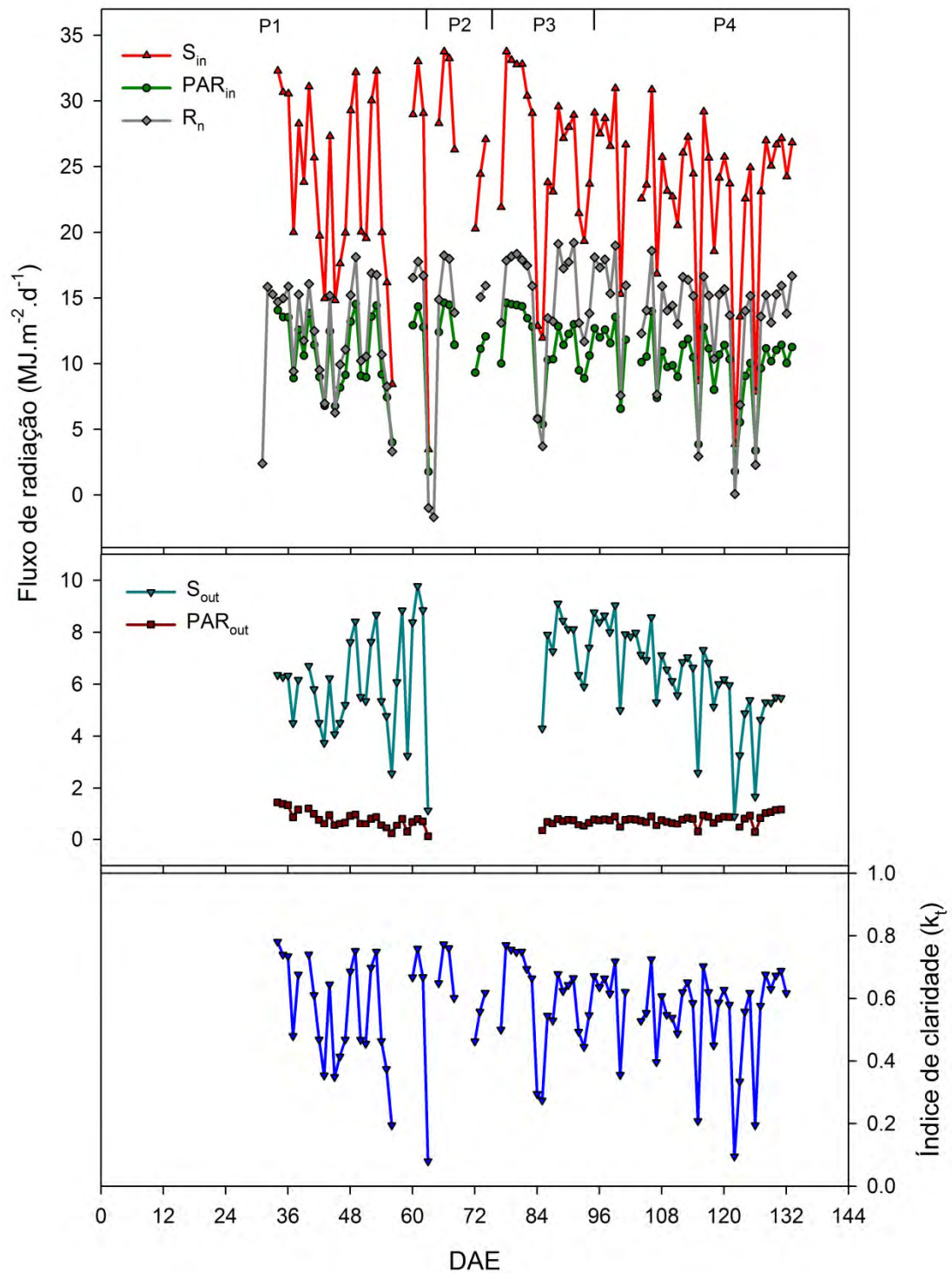


Figura 11. Valores de irradiância solar incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}), radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}) e saldo de radiação (R_n) ao longo do ciclo da cultura.

Tabela 5. Valores de irradiância solar incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}), radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}), albedo e coeficiente de reflexão da radiação PAR (CR_{PAR}), saldo de radiação (R_n), índice de claridade (k_t) e índice de área foliar (IAF). Os valores de radiação estão em $MJ.m^{-2}.d^{-1}$, os de albedo e CR_{PAR} estão em %, o k_t é adimensional e o IAF está em $m^2.m^{-2}$

Período	S_{in}	S_{out}	PAR_{in}	PAR_{out}	Albedo	CR_{PAR}	R_n	k_t	IAF
P1	24,27	6,03	10,89	0,82	24,73	7,75	12,41	0,56	1,59
P2	25,10	-	11,11	-	-	-	15,92	0,57	3,93
P3	26,14	7,60	11,51	0,69	30,13	6,32	15,26	0,60	4,36
P4	22,70	5,94	9,75	0,79	25,91	7,96	13,10	0,55	2,81

A irradiância solar refletida (S_{out}) apresentou tendência bem definida ao longo do ciclo da cultura (Figura 11), acompanhando o índice de área foliar (IAF), sendo que a medida que o IAF aumentava a S_{out} se tornava maior (Tabela 5). Em média, os valores da S_{out} foram de 6,03 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ (P1), 7,6 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ (P3) e 5,94 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ (P4), enquanto que os do IAF foram de 1,59 $m^2.m^{-2}$ (P1), 3,93 $m^2.m^{-2}$ (P2), 4,36 $m^2.m^{-2}$ (P3) e 2,81 $m^2.m^{-2}$ (P4). Essa tendência de aumento da S_{out} em relação ao incremento de área foliar pela planta deve-se possivelmente ao fato da refletividade da irradiância solar pela folha da cultura do milho ser superior àquela do solo. Por outro lado, a radiação fotossinteticamente ativa refletida (PAR_{out}) tendeu a diminuir a medida que o IAF aumentou devido a maior absorção da banda espectral da PAR (0,4 a 0,7 μm) pelas folhas, alcançando o menor valor, em termos médios, de 0,69 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ no período P3.

O saldo de radiação (R_n) apresentou valores de 12,41 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ (P1), 15,92 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ (P2), 15,26 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ (P3) e 13,10 $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ (P4) (Tabela 5). Apesar de também possuir uma relação praticamente linear em relação à S_{in} , o R_n não acompanhou totalmente a variação da S_{in} , uma vez que no período P3, em que a S_{in} foi maior, o R_n apresentou valor inferior ao do período P2. Essa diferença no comportamento do R_n em relação à S_{in} deveu-se possivelmente a um maior albedo no período P3 em relação ao período P2, ocasionado pelo maior IAF, que fez com que a influência do aumento da S_{in} no R_n fosse atenuada por uma maior reflexão da irradiância solar, resultando em menor aumento do R_n .

O albedo da cultura variou de 19,68% (34 DAE) a 32,66% (100 DAE), enquanto o coeficiente de reflexão da PAR (CR_{PAR}) apresentou um valor mínimo de 5,46% (60 DAE) e máximo de 10,63% (129 DAE), acompanhando a variação do IAF (Figura 12).

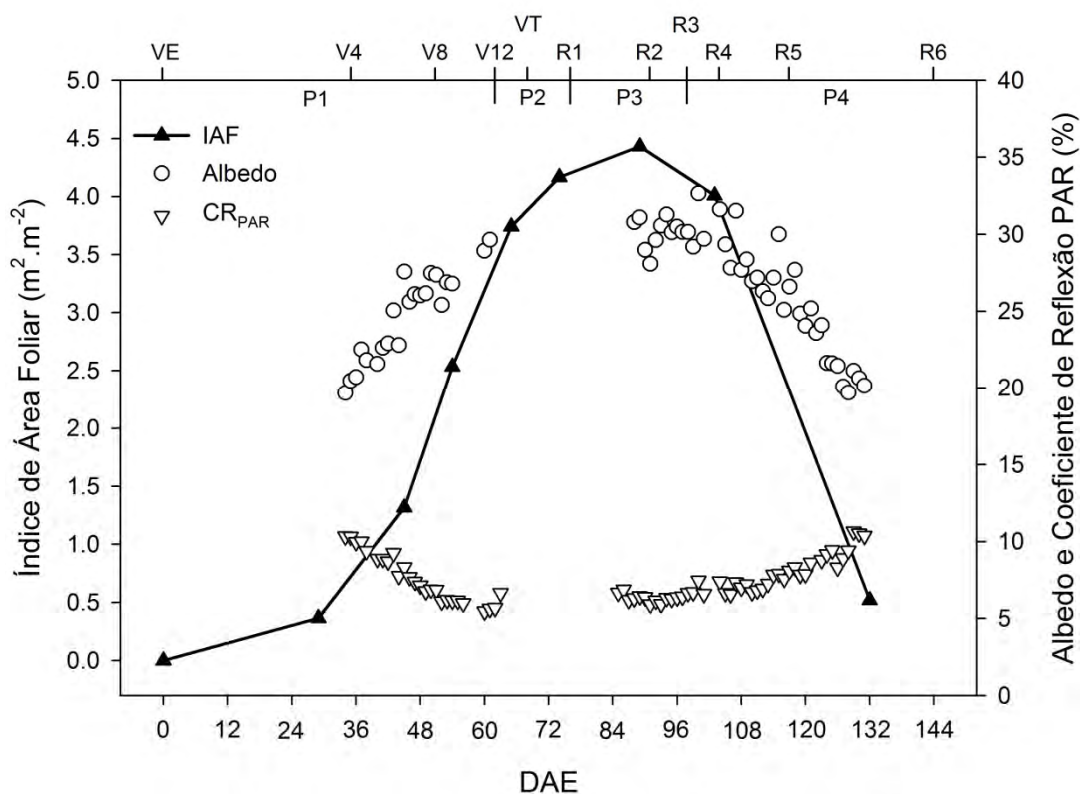


Figura 12. Índice de área foliar (IAF), albedo (Albedo) e coeficiente de reflexão da radiação fotossinteticamente ativa (CR_{PAR}) ao longo do ciclo da cultura.

À medida que o IAF aumentou, o albedo da cultura apresentou uma tendência de aumento e o CR_{PAR} a diminuir, apresentando uma boa relação tanto entre o IAF e o albedo, quanto entre o IAF e o CR_{PAR} , o que é confirmado por meio dos coeficientes de determinação obtidos de 0,79 e 0,71, respectivamente (Figura 13). Essa diferença de comportamento do albedo e do CR_{PAR} em relação ao IAF deve-se à forma com que as bandas espectrais da radiação solar (0,3 a 4 μm) e da PAR interagem com a superfície. Em uma superfície sem vegetação, o albedo tende a ser menor do que em uma superfície vegetada, principalmente se o solo estiver úmido, o que torna o solo mais escuro, reduzindo a reflexão da superfície (DALMOLIN et al., 2005). O processo oposto ocorre com o CR_{PAR} , devido a

absorção da radiação fotossinteticamente ativa pela vegetação para a realização da fotossíntese. Resultados semelhantes do comportamento do albedo da cultura foram encontrados por Souza et al. (2010) para a cultura de soja, em que no início do plantio, quando o solo se encontrava parcialmente coberto, com pequeno IAF, o albedo foi em torno de 16 a 17%, enquanto que quando o IAF atingiu o valor máximo, o albedo aumentou para 24%.

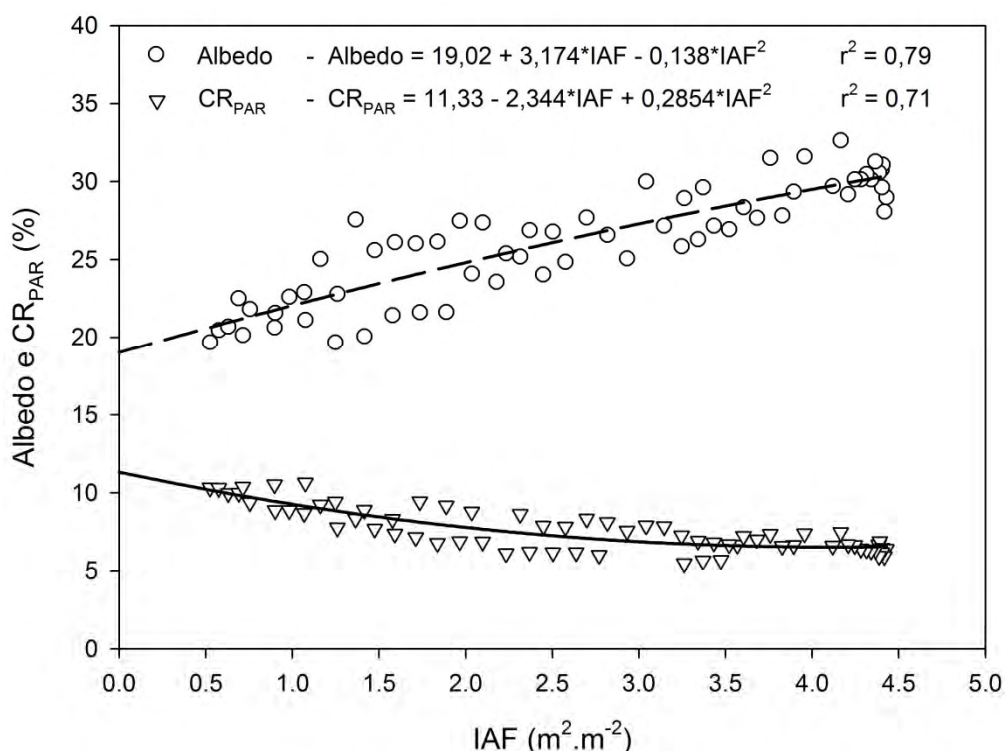


Figura 13. Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) com o albedo e o coeficiente de reflexão da radiação fotossinteticamente ativa (CR_{PAR}).

O albedo da cultura, em média, foi maior no período P3 (30,91%), em que o IAF médio foi de $4,36 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, e menor no período P1 (24,73%), quando o IAF médio foi de $1,59 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (Tabela 5). Os valores do albedo encontrados no presente estudo foram um pouco maiores àqueles obtidos em estudos realizados em latitudes inferiores, como o de Oguntunde e Van de Giesen (2004), realizado em Gana (latitude de $7^{\circ}20'N$), que obtiveram albedo de 27,6% quando a cultura do milho apresentou um IAF de $4,47 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Todavia, os maiores valores de albedo encontrados na presente

pesquisa podem ser devido à maior quantidade de radiação solar que chega à superfície no período em que foi realizado o experimento, uma vez que a duração astronômica do dia ao longo do ciclo da cultura é em média de 13,3 horas, fazendo com que a cultura não necessitasse ser tão eficiente na absorção da radiação disponível.

4.2.3. Variabilidade horária

O comportamento médio diário da temperatura do ar foi bem típico, com valores mínimos de 16,4 °C (P1), 19,6 °C (P3) e 19,7 °C (P4), ocorrendo próximos de 6:00 horas, havendo um aumento gradativo após esse horário até atingir os valores máximos de 27,3 °C (P1), 29,9 °C (P3) e 28,7 °C (P4), entre às 14:00 e 16:00 horas (Figura 14).

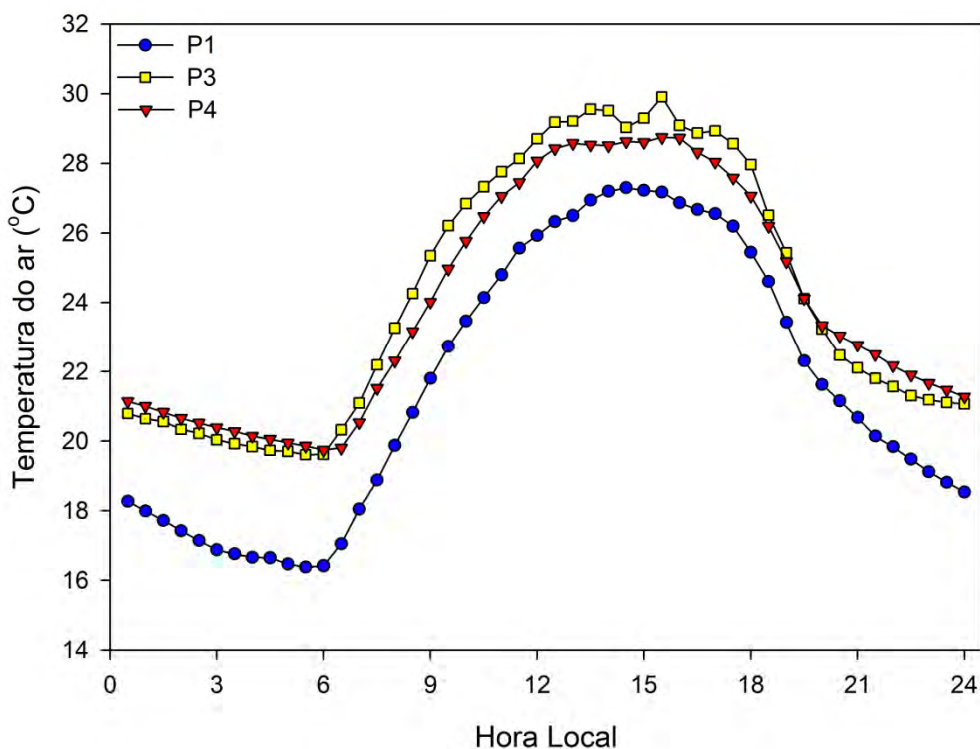


Figura 14. Ciclo médio diário da temperatura do ar nos períodos P1, P3 e P4.

O período P1 apresentou os menores valores de temperatura do ar ao longo de todo o dia, enquanto o período P3 apresentou maiores valores durante o dia e menores à noite, em relação ao período P4. Essas

diferenças entre os períodos P3 e P4 devem-se à menor cobertura de nuvens no período P3, permitindo maior entrada de radiação solar durante o dia, tornando a temperatura do ar mais elevada. Por outro lado, a menor cobertura de nuvens permite maior perda radiativa durante a noite, fazendo com que a temperatura do ar tenha valores mais baixos nesse período do dia. Por sua vez, os menores valores de temperatura do ar obtidos ao longo de todo o dia no período P1 devem-se possivelmente à chegada de massas de ar frio.

Em média, o período da tarde (12:00 às 18:00 h) apresentou temperaturas do ar 17% mais elevadas em relação ao período da manhã (6:00 às 12:00 h), contribuindo para déficits de pressão de vapor aproximadamente 100% superiores ao período da tarde (Figura 15). Esse aumento no déficit de pressão de vapor em relação ao acréscimo de temperatura do ar deve-se à relação exponencial existente entre a pressão de saturação do vapor d'água e a temperatura do ar.

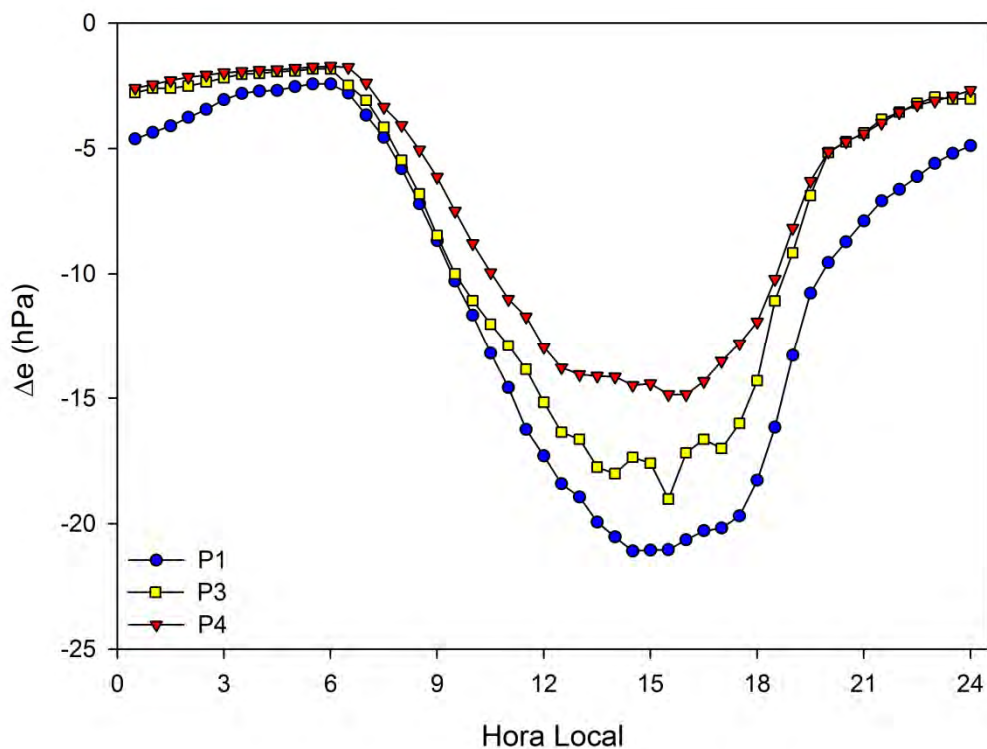


Figura 15. Ciclo médio diário do déficit de pressão de vapor (Δe) nos períodos P1, P3 e P4.

Acompanhando o comportamento da temperatura do ar, os menores déficits de pressão de vapor ocorreram próximos de 6:00 horas, com valores de -2,43 hPa (P1), -1,83 hPa (P3) e -1,71 hPa (P4), enquanto que os maiores valores foram observados entre 14:00 e 16:00 horas, cerca de -21,09 hPa (P1), -19,02 hPa (P3) e -14,85 hPa (P4). Apesar do período P1 apresentar os menores valores médios diários de temperatura do ar ao longo do dia, bem como umidade do solo aproximadamente 17% superior aos períodos P3 e P4 (Tabela 3), nesse período foram observados maiores valores de déficit de pressão de vapor. Tal fato pode ter ocorrido devido ao menor IAF da cultura no período P1, que pode ter proporcionado menor evapotranspiração naquele período, como será observado mais a frente, reduzindo a pressão de vapor d'água.

A irradiância solar incidente obteve maiores valores próximo ao meio dia local, alcançando $897,66 \text{ W.m}^{-2}$ (P1), $841,84 \text{ W.m}^{-2}$ (P2), $922,47 \text{ W.m}^{-2}$ (P3) e $817,11 \text{ W.m}^{-2}$ (P4) (Figura 16). Devido à forte relação existente entre a S_{in} e a PAR_{in} , o comportamento da PAR_{in} foi muito semelhante ao da S_{in} , com os maiores valores da PAR_{in} ocorrendo quando a S_{in} foi mais elevada, obtendo máximos de $406,79 \text{ W.m}^{-2}$ (P1), $388,73 \text{ W.m}^{-2}$ (P2), $422,07 \text{ W.m}^{-2}$ (P3) e $363,00 \text{ W.m}^{-2}$ (P4).

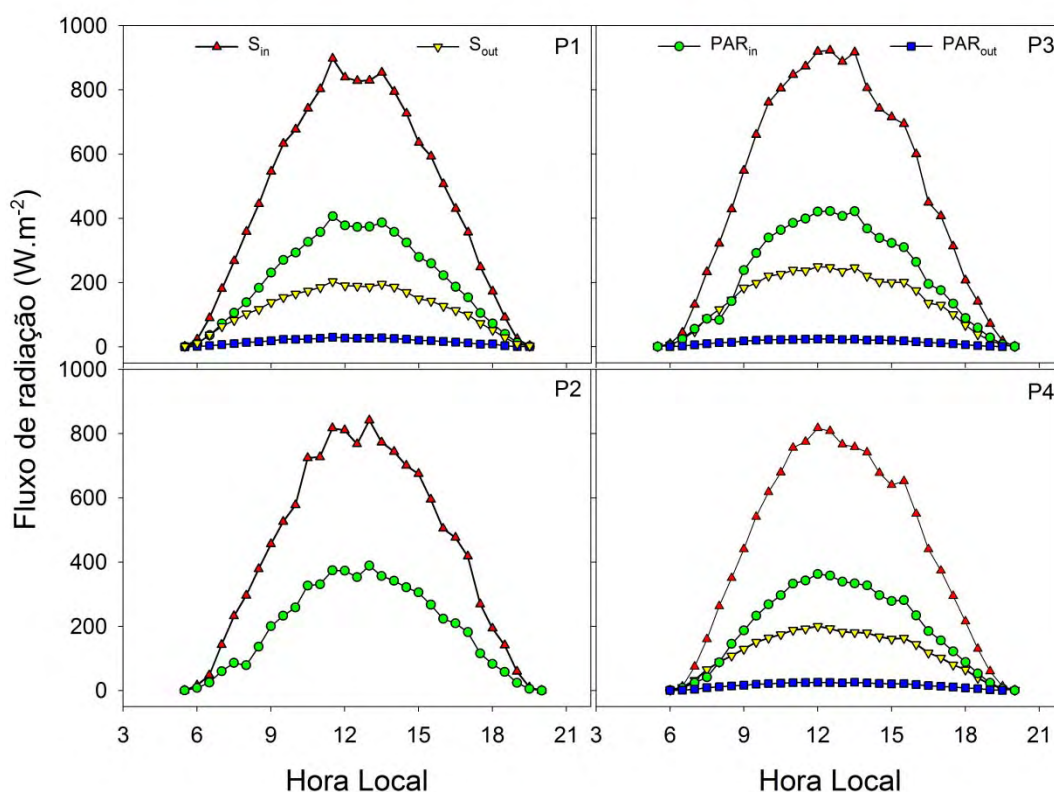


Figura 16. Ciclo médio diário da irradiância solar incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}) e radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}) nos períodos P1, P2, P3 e P4.

A irradiância solar refletida (S_{out}) apresentou maiores valores no período P3, com valor máximo de $249,97 \text{ W.m}^{-2}$, e menores no período P4, em que alcançou $200,49 \text{ W.m}^{-2}$, acompanhando a variabilidade da S_{in} . No período P1, o valor máximo encontrado foi de $204,23 \text{ W.m}^{-2}$. Por outro lado, os menores valores da radiação fotossinteticamente ativa refletida (PAR_{out}) foram encontrados no período P3, com valor máximo de $23,97 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto que os maiores foram obtidos no período P1, com máximo de $30,18 \text{ W.m}^{-2}$. No período P4 o valor máximo encontrado foi de $25,86 \text{ W.m}^{-2}$.

Em média, a S_{in} e a PAR_{in} foram aproximadamente 14,9 e 17,7%, respectivamente, inferiores entre 6:00 e 12:00 horas em relação ao período de 12:00 às 18:00 horas. Essa maior quantidade de radiação no período de 12:00 às 18:00 horas deve-se provavelmente à menor cobertura de nuvens durante esse período do dia, como pode ser comprovado através do índice de claridade, que apresentou valor médio de 0,47 entre 6:00 e 12:00 horas e de 0,60 entre 12:00 e 18:00 horas (Figura 17). Por sua vez, o aumento da S_{in}

e da PAR_{in} no período de 12:00 às 18:00 horas resultaram em um acréscimo de 8,7 e 7,7 % na S_{out} e PAR_{out} , respectivamente.

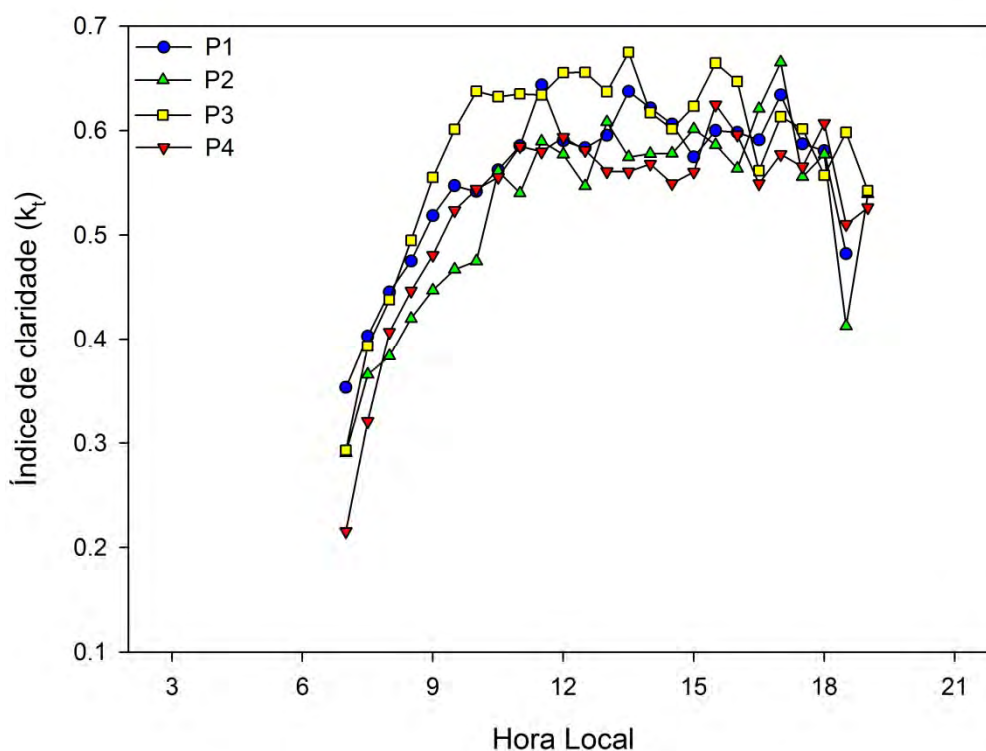


Figura 17. Ciclo médio diário do índice de claridade nos períodos P1, P2, P3 e P4.

Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os ciclos médio diários do albedo e do coeficiente de reflexão PAR, respectivamente, nos períodos P1, P3 e P4. Tanto o albedo quanto o CR_{PAR} apresentaram ciclo diário bem típico, com maiores valores no início da manhã e final da tarde e menores próximo ao meio dia local, entre 12 e 13 horas, devido possivelmente a maior penetração da radiação no dossel, ocasionada pela arquitetura da cultura do milho, obtendo valores mínimos de 22,62% (P1), 26,44% (P3) e 23,82% (P4) para o albedo e de 7,14% (P1), 5,59% (P3) e 7,03% (P4) para o CR_{PAR} .

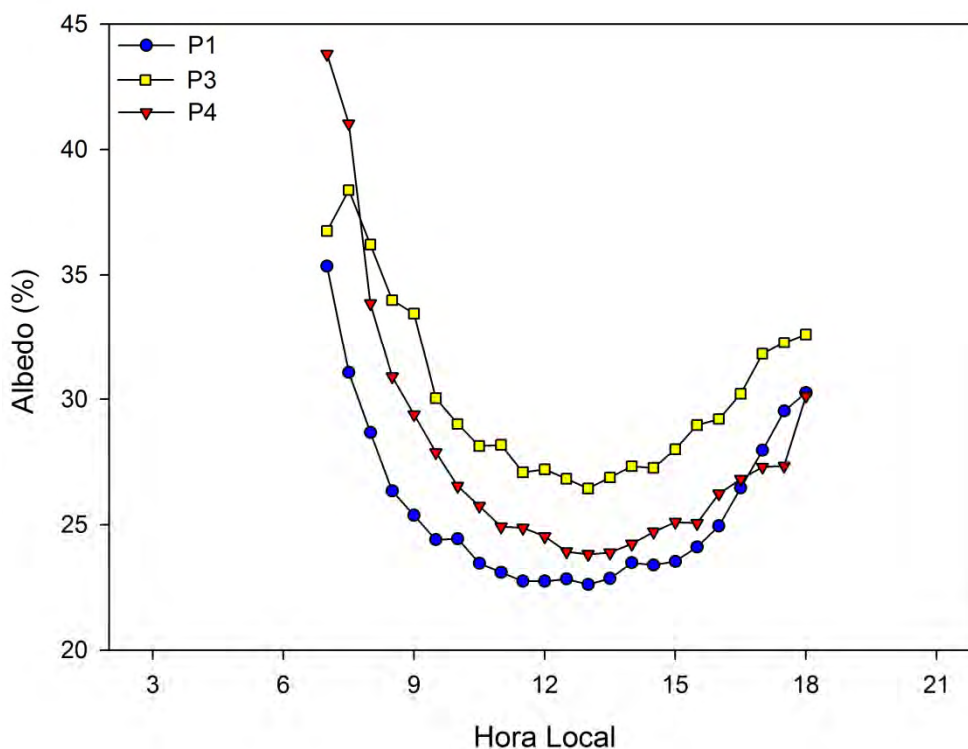


Figura 18. Ciclo médio diário do albedo nos períodos P1, P3 e P4.

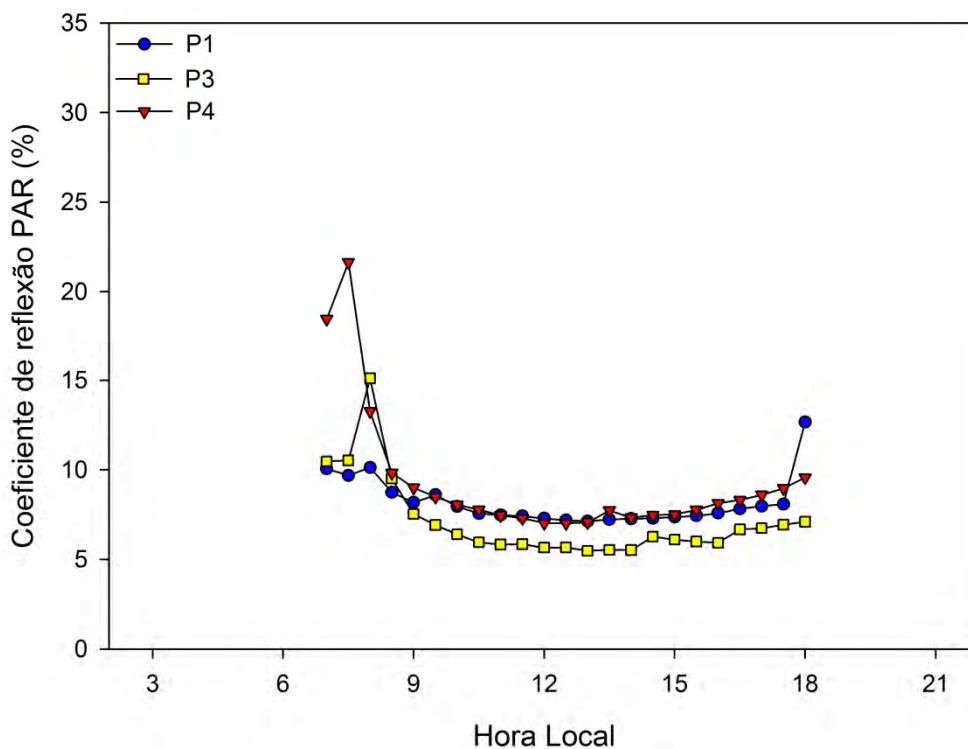


Figura 19. Ciclo médio diário do coeficiente de reflexão da radiação fotossinteticamente ativa nos períodos P1, P3 e P4.

4.3. Interação da Radiação Fotossinteticamente Ativa com a Vegetação

A radiação fotossinteticamente ativa incidente na base do dossel (PAR_{inb}) apresentou variabilidade típica ao longo do ciclo da cultura, com uma acentuada diminuição à medida que o IAF da cultura aumentou, atingindo valor mínimo de $0,3 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 85 DAE, próximo ao IAF máximo (Figura 20). Após a ocorrência do valor mínimo, a PAR_{inb} obteve um lento, porém, gradual, aumento à medida que o IAF diminuía devido à senescência das folhas. De modo contrário, a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (PAR_{abs}) apresentou acentuado aumento com o incremento do IAF, com valor máximo de $12,00 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 106, e tendência de diminuição após a cultura ter atingido o IAF máximo, devido possivelmente ao decréscimo da área foliar verde.

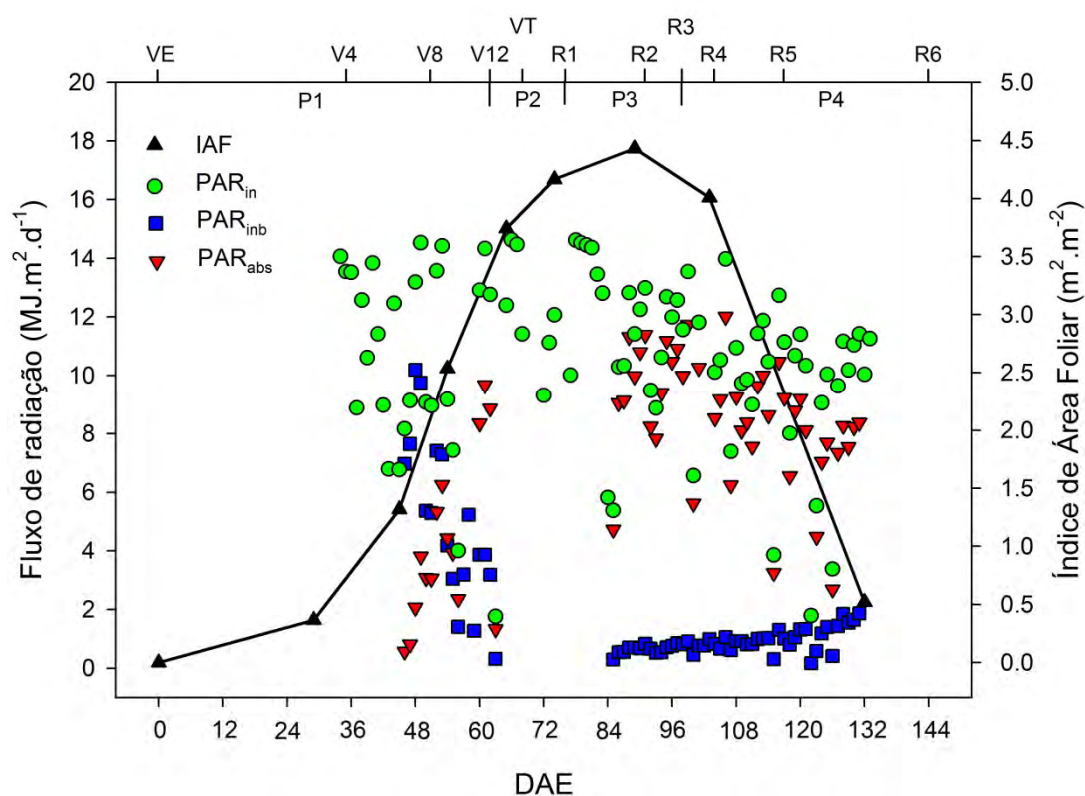


Figura 20. Índice de área foliar (IAF), PAR incidente (PAR_{in}), PAR incidente na base do dossel (PAR_{inb}) e PAR absorvida (PAR_{abs}) ao longo do ciclo da cultura.

De modo semelhante à PAR_{abs} , a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) apresentou acentuado aumento com a elevação do IAF, atingindo valor máximo de 0,88 aos 94 DAE (Figura 21), bem como gradual diminuição após a ocorrência do máximo valor do IAF, ocasionado pela senescência das folhas. A FAPAR apresentou alta correlação com o IAF da cultura acima de 40 cm de altura da superfície, o que pode ser comprovado por meio dos coeficientes de determinação de 0,99, obtido no período anterior a cultura atingir o máximo IAF (DAE 90), e de 0,95 após a ocorrência do máximo IAF (Figura 22).

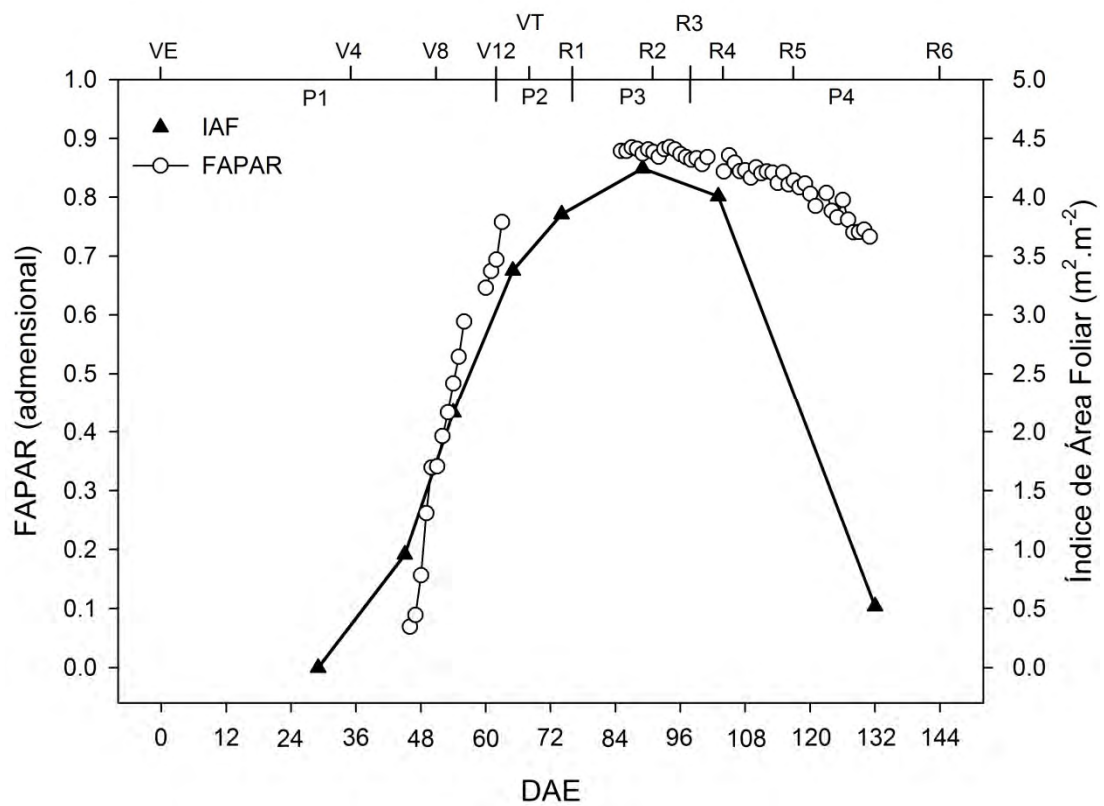


Figura 21. Valores do índice de área foliar (IAF) da cultura acima de 40 cm de altura da superfície e fração da PAR absorvida (FAPAR) ao longo do ciclo da cultura.

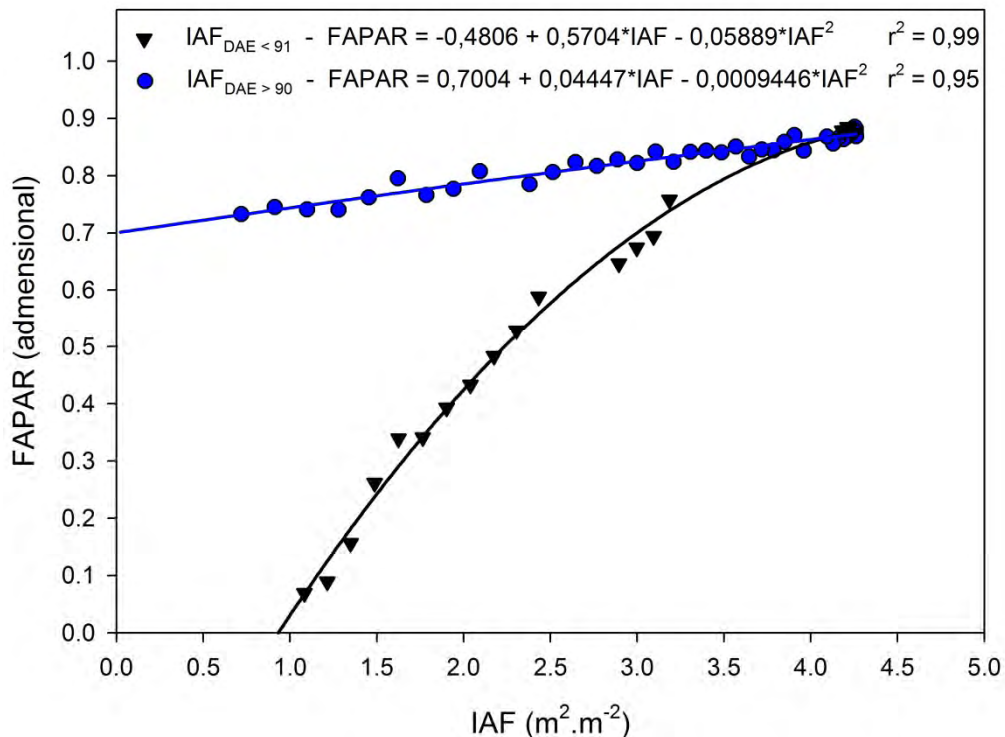


Figura 22. Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) da cultura acima de 40 cm de altura da superfície e da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR).

Em se tratando de valores médios, a quantidade de PAR_{inb} foi menor no período P3 ($0,64 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) (Tabela 6), no qual o IAF obteve maior valor, enquanto que o menor IAF no período P1 proporcional maiores níveis de radiação na base do dossel, resultando no valor médio de $5,37 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. O menor valor do IAF no período P1 também proporcionou menor interceptação (PAR_{int}) e absorção da PAR pelo dossel, resultando em valores médios de $4,82$ e $4,13 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, respectivamente, bem como menores valores da fração da PAR_{int} (FIPAR) e FAPAR, com valores de $0,45$ e $0,38$, respectivamente. Deve-se ressaltar que a principal diferença entre a FIPAR e a FAPAR está no fato de que a FIPAR é a fração da PAR que foi interceptada, podendo essa interceptação ter sido na forma de reflexão ou absorção, enquanto que a FAPAR é a fração da PAR que foi absorvida.

Os maiores valores da PAR_{int} , PAR_{abs} , FIPAR e FAPAR foram encontrados no período P3, com valores de $10,26 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, $9,57 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, $0,94$ e $0,88$, respectivamente. Os resultados da FIPAR

encontrados no presente estudo são pouco mais elevados do que os encontrados por Bergamaschi et al. (2010) para a cultura de milho cultivada pelo método de plantio direto com espaçamento de 0,75 m entre linhas na safra 2001/2002 em Eldorado do Sul – RS. Um dos fatores que pode ter contribuído para a maior FIPAR encontrada pode ser possivelmente o maior IAF obtido no presente estudo.

No período P4, devido à senescência das folhas, ocorreu redução tanto na FIPAR quanto na FAPAR (Tabela 6). Entretanto, a redução foi mais pronunciada na FAPAR, aproximadamente 6,8%, enquanto que na FIPAR foi de 4,2%. Essa menor redução da FIPAR ocorreu, provavelmente, devido ao aumento do coeficiente de reflexão da radiação fotossinteticamente ativa, o qual atenua a redução da FIPAR.

Tabela 6. Valores da PAR incidente (PAR_{in}), PAR incidente na base do dossel (PAR_{inb}), PAR interceptada (PAR_{int}), fração da PAR interceptada (FIPAR), PAR absorvida (PAR_{abs}) e fração da PAR absorvida (FAPAR)

Período	PAR_{in} (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	PAR_{inb} (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	PAR_{int} (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	FIPAR	PAR_{abs} (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	FAPAR
P1	10,89	5,37	4,82	0,45	4,13	0,38
P2	11,11	-	-	-	-	-
P3	11,51	0,64	10,26	0,94	9,57	0,88
P4	9,75	0,99	8,70	0,90	8,14	0,82

Avaliando o ciclo médio diário, a PAR_{inb} apresentou valores máximos entre 11:00 e 12:00 horas, atingindo 1.135,35 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P1), 221,07 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P3) e 236,36 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P4) (Figura 23). Os máximos da PAR_{abs} ocorreram entre 12:00 e 13:30 horas, com valores de 762,30 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P1), 1777,91 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P3) e 1337,02 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P4). Apesar do pico máximo ter ocorrido na parte da manhã, a PAR_{inb} foi cerca de 6,7% inferior entre 6:00 e 12:00 horas em relação ao período das 12:00 às 18:00 horas, devido, provavelmente, a menor quantidade de PAR_{in} no período da manhã, ocasionado pela maior cobertura de nuvens. A PAR_{abs} também apresentou-se aproximadamente 25,72% superior no período de 12:00 às 18:00 horas, sendo que a maior diferença entre os períodos da

manhã e da tarde foi encontrada no período P1 (cerca de 36%). Deve-se ressaltar que em parte do período P1 o dossel da cultura não se encontrava totalmente fechado e que possíveis diferenças na área foliar que interceptavam os raios solares nos períodos da manhã e da tarde podem ter causado essa maior diferença entre os períodos da manhã e da tarde.

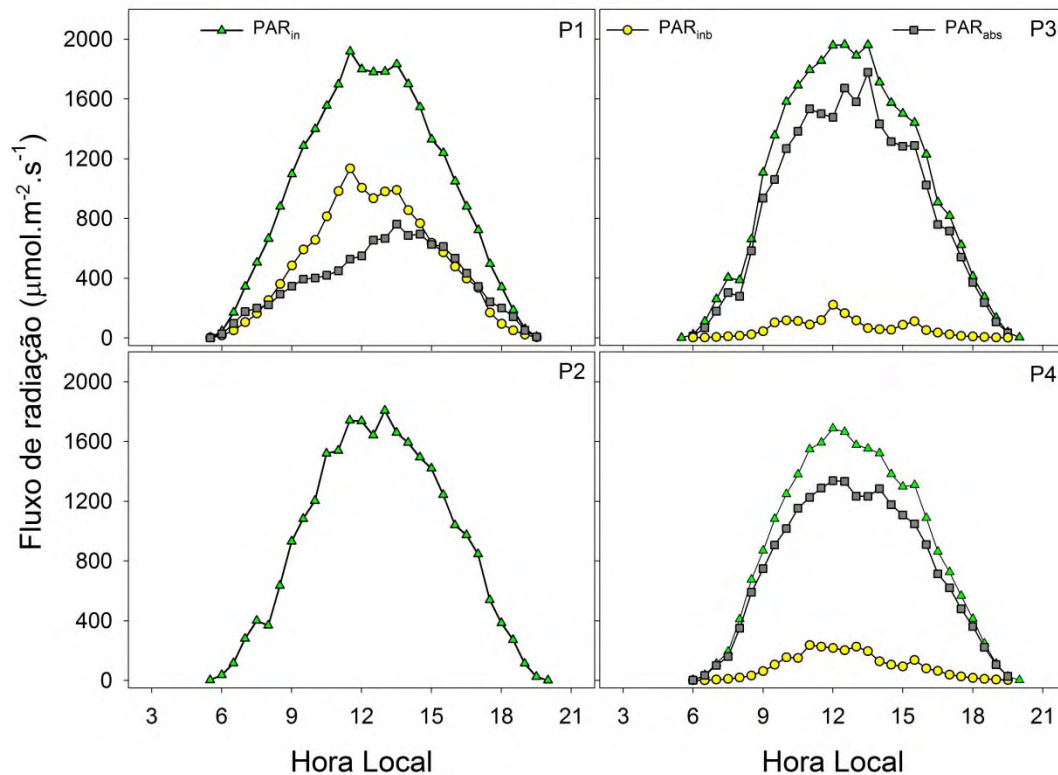


Figura 23. Ciclo médio diário da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}), incidente na base da cultura (PAR_{inb}) e absorvida (PAR_{abs}) nos períodos P1, P3 e P4.

O comportamento da FAPAR no período P1 também pode estar associado as possíveis diferenças de área foliar que interceptavam a radiação nos períodos da manhã e da tarde, sendo a FAPAR aproximadamente 8,9% mais elevada entre as 12:00 e 18:00 horas em relação ao período de 6:00 às 12:00 horas (Figura 24). No período P1 há uma diminuição da FAPAR à medida que a elevação solar aumenta, atingindo valor mínimo de 0,33 quando a PAR_{in} foi máxima, indicando diminuição da absorção da PAR, o que pode ter ocorrido devido à saturação luminosa. Adicionalmente, devido ao método de plantio utilizado, onde o solo fica coberto, de forma não homogeneia, por palha da cultura anterior, a

propriedade que a superfície tem de refletir a PAR é modificada continuamente, e como em parte do período P1 o dossel não está fechado, a variabilidade da PAR refletida pelo solo exerce grande influência na FAPAR. Por outro lado, os períodos P3 e P4 apresentaram uma leve tendência de aumento da FAPAR ao longo do dia, ocasionada, provavelmente, pela maior quantidade de radiação fotossinteticamente ativa incidente na base do dossel aliada ao maior poder de absorção das folhas do dossel inferior.

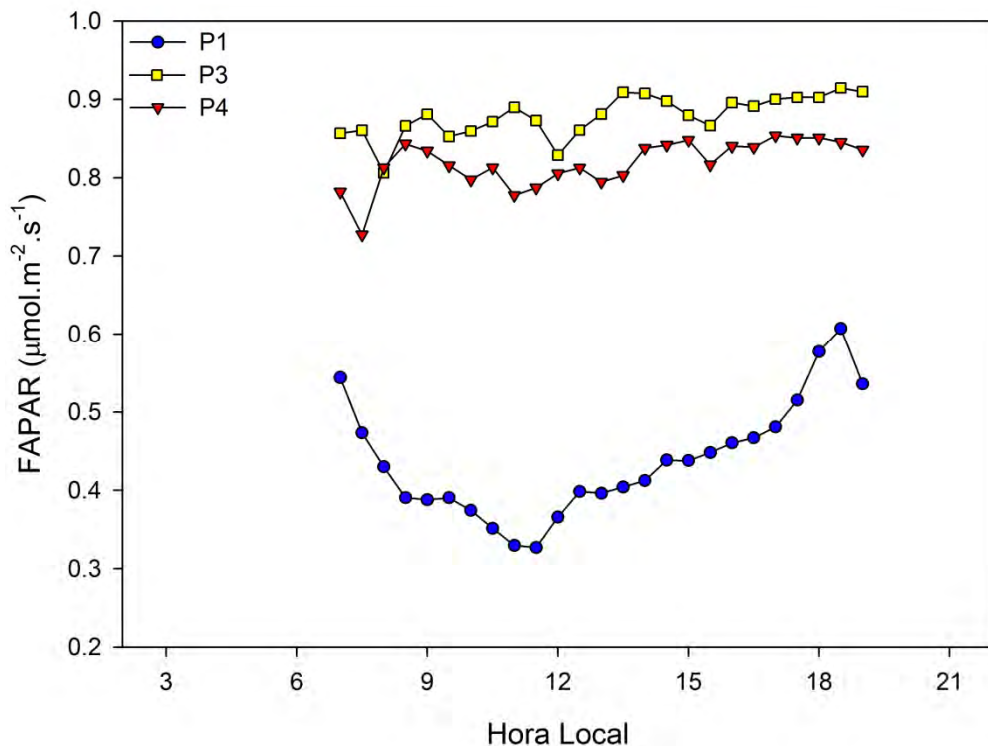


Figura 24. Ciclo médio diário da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) nos períodos P1, P3 e P4.

4.4. Fluxo de Dióxido de Carbono

Na Figura 25 são apresentados os resultados dos fluxos de carbono diurno e noturno ao longo do ciclo da cultura, em que valores negativos representam assimilação de carbono pela cultura, enquanto os valores positivos indicam emissão de carbono. Para a diferenciação de fluxo de carbono diurno e noturno optou-se por considerar fluxo diurno como o primeiro fluxo negativo no início da manhã e noturno como o primeiro fluxo

positivo ao final da tarde. Apesar da boa relação existente entre o IAF e a absorção de carbono, a máxima assimilação de carbono ($-14,03 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 74 DAE) não ocorreu quando o IAF foi máximo, mas sim ao final do período P2. Alguns fatores, como a menor disponibilidade hídrica e temperaturas mais elevadas nesse período, podem ter contribuído para a ocorrência de menores absorções de carbono, uma vez que com a menor disponibilidade hídrica a planta é induzida a diminuir a abertura dos estômatos, restringindo a perda de água através da transpiração, bem como a assimilação de CO_2 (HOLLINGER et al., 1994). Por sua vez, maiores temperaturas tendem a aumentar a respiração do solo (SUYKER et al., 2004), reduzindo a quantidade de carbono absorvido pela cultura.

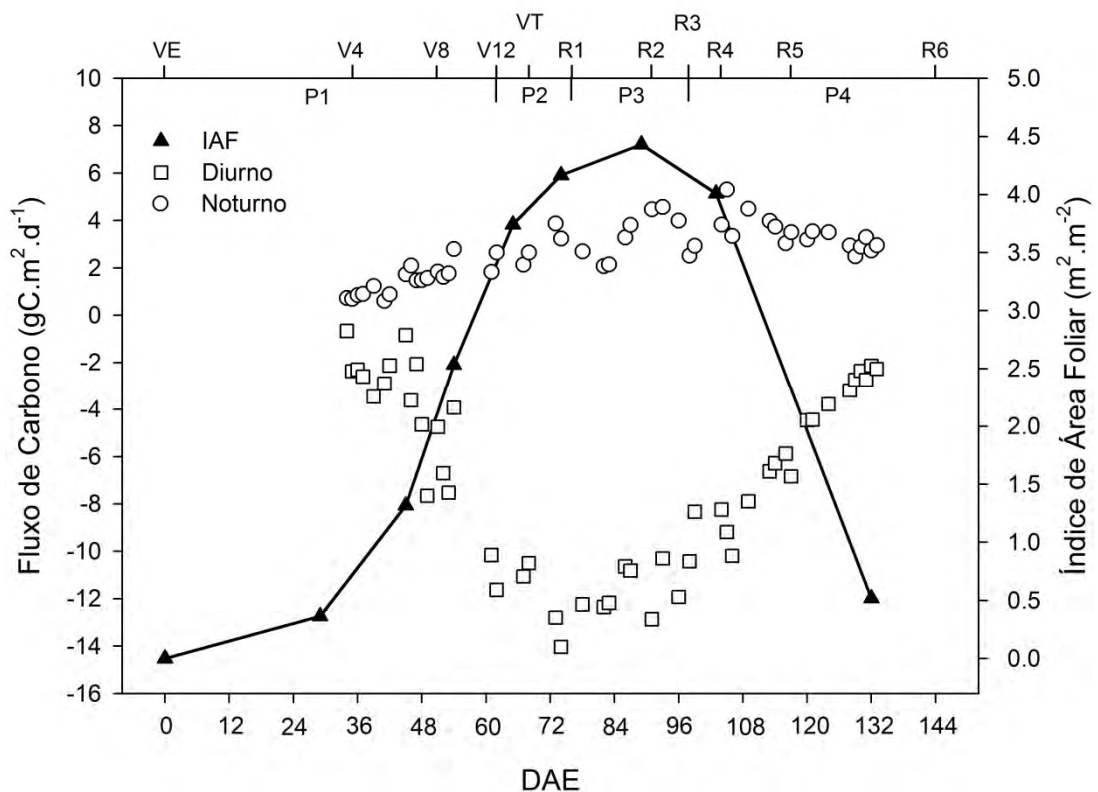


Figura 25. Variabilidade do índice de área foliar (IAF) e fluxos de carbono diurno (Diurno) e noturno (Noturno) ao longo do ciclo da cultura.

O fluxo de carbono noturno apresentou tendência de aumento com o incremento do IAF, atingindo valor máximo de $5,31 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 105 DAE, sendo este resultado inferior ao encontrado por Suyker et al. (2005) em uma cultura de milho irrigado, os quais obtiveram valores máximos de respiração entre 12 e $13 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

O IAF apresentou melhor correlação com os fluxos de CO₂ diurnos do que com os noturnos, apresentando coeficientes de determinação de 0,87 e 0,41, respectivamente (Figura 26). Essa melhor correlação entre o IAF e os fluxos de CO₂ diurnos deveu-se possivelmente ao fato de que a absorção de CO₂ ocorre através da fotossíntese, a qual é altamente dependente da área foliar que intercepta a radiação fotossinteticamente ativa, sendo o IAF um dos principais fatores que controlam a absorção de CO₂ (SUYKER et al., 2004), enquanto que as emissões de CO₂ noturnas são causadas tanto pela respiração de manutenção da planta (respiração autotrófica), quanto pelas atividades microbianas (respiração heterotróficas), as quais são primariamente controladas pela temperatura, umidade do solo e IAF (ROCHETTE et al., 1996; SUYKER et al., 2004).

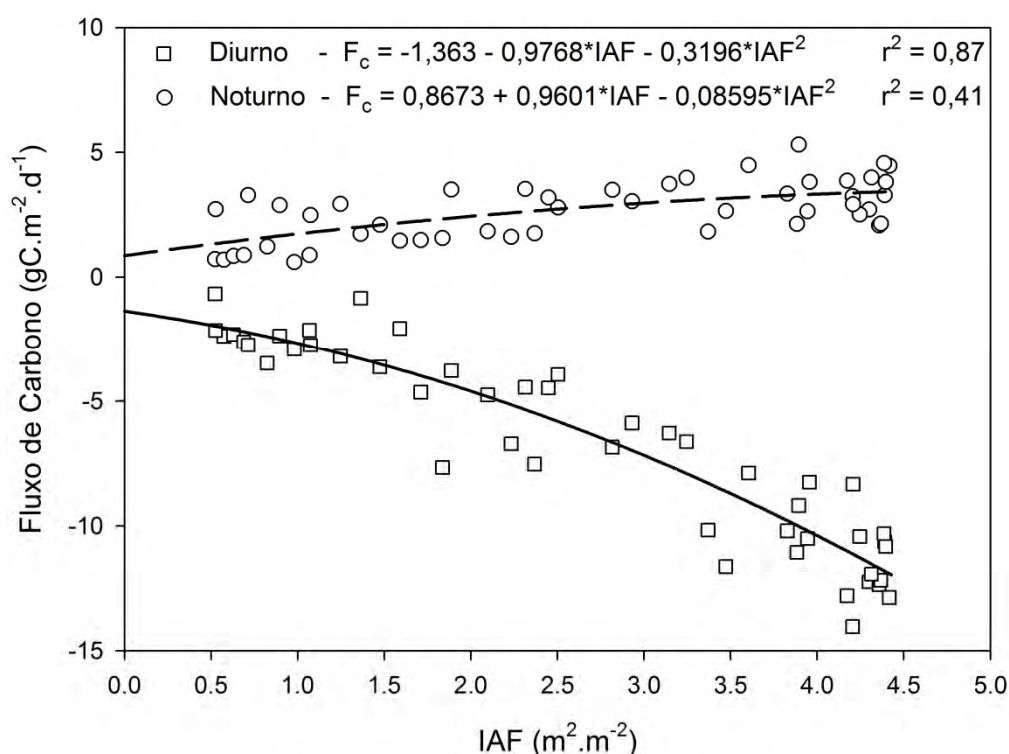


Figura 26. Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) e dos fluxos de carbono diurno (Diurno) e noturno (Noturno) ao longo do ciclo da cultura.

Em média, o fluxo de carbono noturno foi maior nos períodos P3 e P4, com valor de 3,38 gC.m⁻².d⁻¹ em ambos os períodos (Tabela 7), enquanto que o menor valor foi encontrado no período P1, no qual a cultura

apresentava menor IAF, realizando, assim, menos respiração de manutenção. Por sua vez, os maiores valores do fluxo de carbono diurno foram encontrados no período P2, com valor médio de $-12 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, ao passo que os menores foram obtidos no período P1, com média de $-4,02 \text{ gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

Tabela 7. Valores do índice de área foliar (IAF) e fluxos de carbono diário (F_c Diário), diurno (F_c Diurno) e noturno (F_c Noturno)

Período	IAF ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)	F_c Diário ($\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	F_c Diurno ($\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	F_c Noturno ($\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
P1	1,59	-2,60	-4,02	1,42
P2	3,93	-9,09	-12,00	2,91
P3	4,36	-8,28	-11,66	3,38
P4	2,81	-2,30	-5,68	3,38

No período P4 foi encontrada uma redução de cerca de 51% no fluxo de carbono diurno, apesar da redução na PAR_{abs} ter sido de aproximadamente 15%. Estudos anteriores, como o realizado por Suyker et al. (2004), têm demonstrado que o rendimento quântico (quantidade de CO_2 absorvido por unidade de PAR absorvida) sofre alterações ao longo do ciclo da cultura, uma vez que segundo PATTEY et al. (1991) a capacidade fotossintética das folhas de milho muda com a idade.

Resultados obtidos no presente estudo demonstram as variações no rendimento quântico ao longo da cultura do milho (Figura 27), a qual obteve maior rendimento quântico no período P1, com valor de $0,033 \text{ mol CO}_2.\text{mol}^{-1} \text{ PAR}_{\text{abs}}$. À medida que a cultura se desenvolveu, o rendimento quântico diminuiu, obtendo valores de 0,024 e 0,015 $\text{mol CO}_2.\text{mol}^{-1} \text{ PAR}_{\text{abs}}$ nos períodos P3 e P4, respectivamente. Baldocchi (1994) analisando as diferenças entre a absorção de CO_2 em culturas C3 (trigo) e C4 (milho), encontrou o rendimento quântico de $0,021 \text{ mol CO}_2.\text{mol}^{-1} \text{ PAR}_{\text{abs}}$ para a cultura de milho no período em que o IAF variou de 1,3 a $3 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, sendo esse valor aproximadamente 36% inferior ao encontrado no período P1. Diferenças nas condições de campo podem ter causado esse menor valor

de rendimento quântico encontrado por Baldocchi (1994), como, por exemplo, menor disponibilidade hídrica, uma vez que a umidade do solo variou de 0,1 a 0,2 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ durante o experimento realizado pelo autor, e no presente estudo foi em média 0,39 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

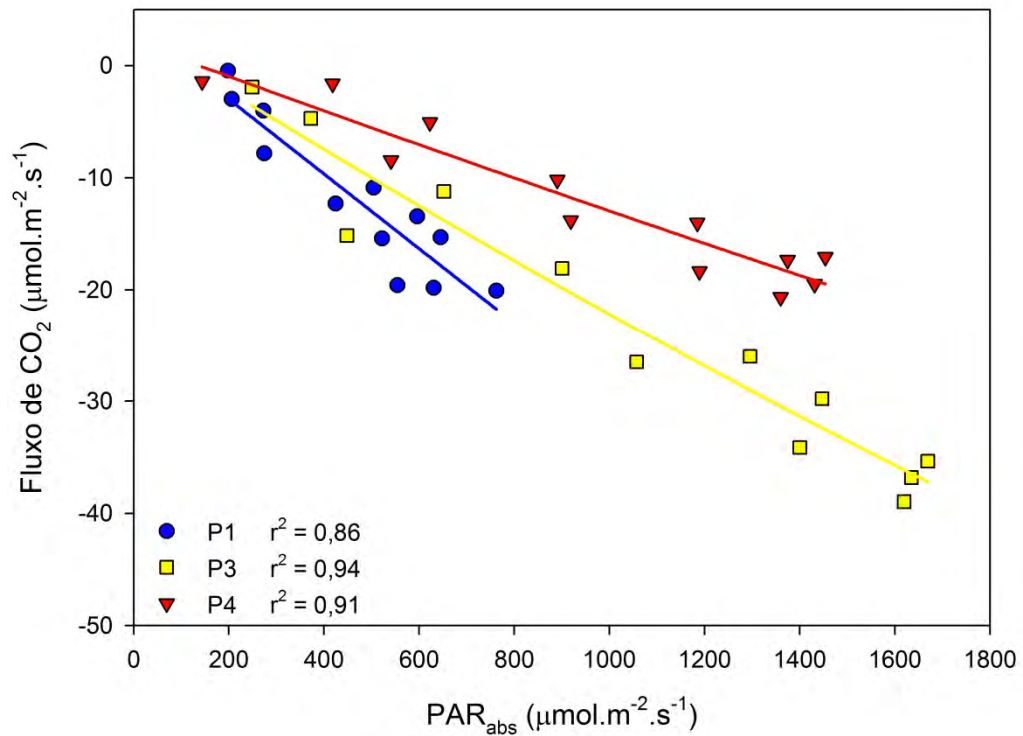


Figura 27. Relação entre os valores médios horários da PAR_{abs} e do fluxo de CO₂ diurno para os períodos P1, P3 e P4.

Avaliando a dependência do fluxo de CO₂ em relação à turbulência do ar, utilizando para isso a velocidade de fricção (u^*) como um indicador da turbulência, não foi identificado aumento do fluxo de CO₂ com o acréscimo da turbulência (Figura 28), indicando bom desempenho da técnica de *Eddy Covariance*, mesmo sob condições de pouca turbulência. Todavia, devido ao *fetch* da cultura, existe preocupação da influência dos fluxos de CO₂ das áreas vizinhas à parcela estudada, uma vez que maiores velocidades do vento (maior u^*) poderiam tornar as medidas de fluxo de CO₂ não representativas apenas da parcela estudada, mas sim de parte da parcela e de parte da área vizinha. Destaca-se, entretanto, que apenas no período P2 foi percebido diminuição dos fluxos de CO₂ a partir do u^* de 0,55 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, não podendo, assim, ser afirmado que essa redução foi causada pela influência

da cobertura vegetal da área vizinha à parcela, uma vez que, segundo Sentelhas e Monteiro (2009), sob maiores velocidades do vento a absorção de CO₂ tende a diminuir devido ao fechamento parcial dos estômatos, sendo este um mecanismo de defesa da planta que reduz a perda de água em excesso.

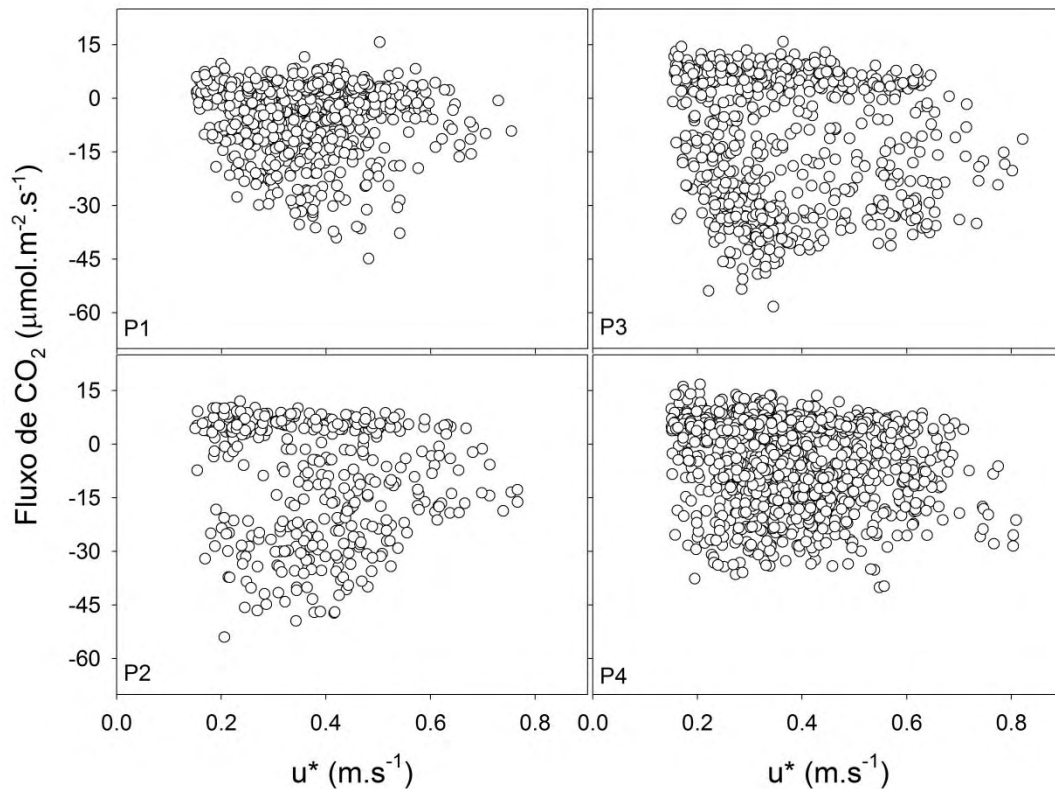


Figura 28. Relação entre os valores horários da velocidade de fricção (u^*) e do fluxo de CO₂ nos períodos P1, P2, P3 e P4.

Em relação a PAR_{abs} , o fluxo de CO₂ apresentou boa correlação, principalmente no período P3, no qual o IAF variou pouco, obtendo o coeficiente de determinação de 0,82 (Figura 29). Todavia, nos períodos em que o IAF obteve maiores variações (períodos mais longos), como é o caso dos períodos P1, em que o IAF aumentou de 0,39 para 3,47 m².m⁻², e do P4, em que o IAF reduziu de 4,25 para 0,52 m².m⁻², houve maior dispersão dos dados de fluxo de CO₂ em relação aos da PAR_{abs} , obtendo valores de coeficiente de determinação de 0,56 e 0,58, respectivamente. Esses resultados evidenciam as modificações no rendimento quântico da cultura em decorrência da idade das folhas, mesmo ao longo de um único período.

A boa correlação encontrada entre a PAR_{abs} e o fluxo de CO_2 , principalmente no período P3, está em concordância com estudos anteriores, como os de Baldocchi (1994), Rochette et al. (1996) e Suyker et al. (2004), nos quais os autores mencionam que as variações nos fluxos de CO_2 diurnos são primariamente controladas pela PAR, pelo IAF e pela umidade do solo.

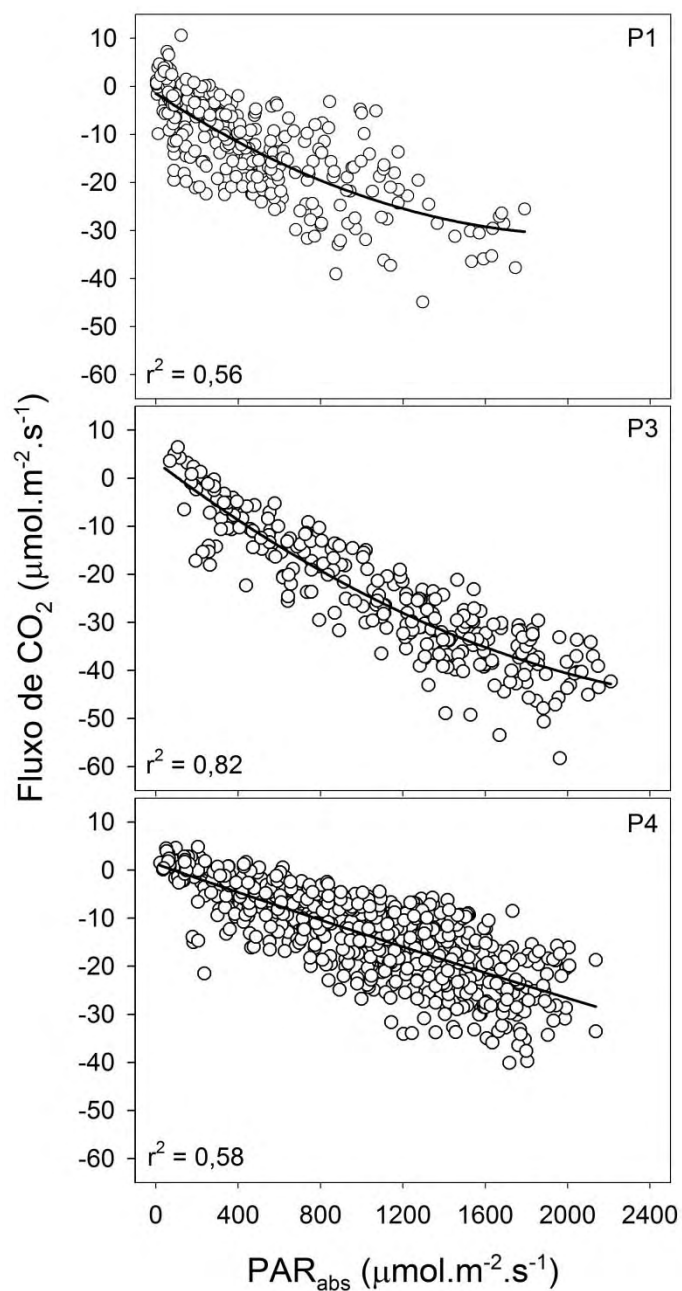


Figura 29. Relação entre os valores horários da PAR_{abs} e do fluxo de CO_2 para os períodos P1, P3 e P4.

Na Figura 30 são apresentados os valores horários do fluxo de CO₂ em função do déficit de pressão de vapor (Δe) para os períodos P1, P3 e P4. No período P1, é observado discreto aumento da absorção do CO₂ à medida que o Δe aumenta, o que pode estar mais relacionado à variabilidade do IAF nesse período do que propriamente ao aumento da demanda evaporativa. No período P3, em que praticamente não há variação no IAF, a absorção de CO₂ tende a ser maior com o aumento do Δe até por volta de 17 hPa. À medida que o Δe se torna maior que 17 hPa a absorção de CO₂ diminui, provavelmente devido a diminuição da condutância estomática, a qual varia em função da água disponível no solo e da demanda evaporativa, e tende a ser maior para baixos valores de Δe , permitindo maior absorção de CO₂ (LAW et al., 2002). Em estudo sobre milho irrigado, Suyker et al. (2004) encontraram menor absorção de CO₂ para déficits de pressão de vapor maiores que 15 hPa, enquanto que Hirasawa e Hsiao (1999) observaram uma diminuição da fotossíntese do milho em dias com Δe maiores que 20 hPa.

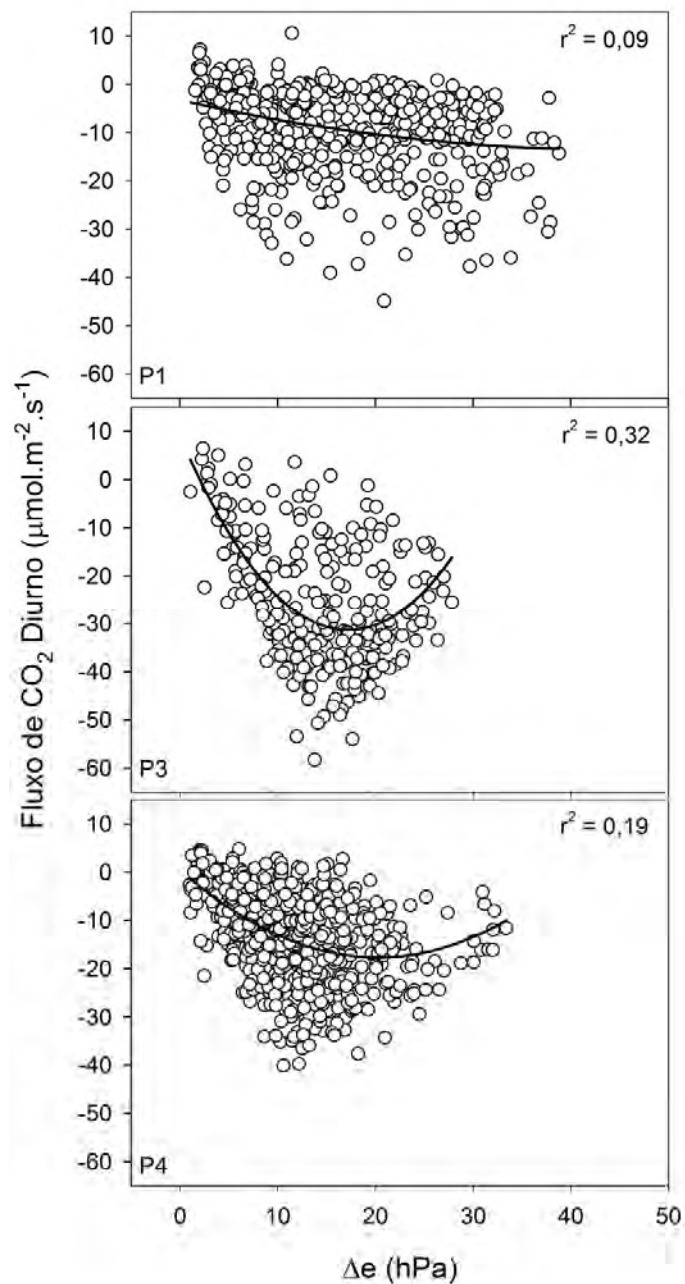


Figura 30. Relação entre os valores horários do déficit de pressão de vapor (Δe) e do fluxo de CO₂ diurno nos períodos P1, P3 e P4.

Em concordância com estudos anteriores, como os Goulden et al. (1996) e Suyker et al. (2004), foram encontradas no presente estudo relações exponenciais entre a temperatura do solo à 10 cm de profundidade e o fluxo de CO₂ noturno ao longo do ciclo da cultura (Figura 31), com r^2 de 0,30. Rochette et al. (1996) e Suyker et al. (2004), relatam que os fluxos de

CO₂ noturnos são primariamente controlados pela temperatura do solo, umidade do solo e IAF.

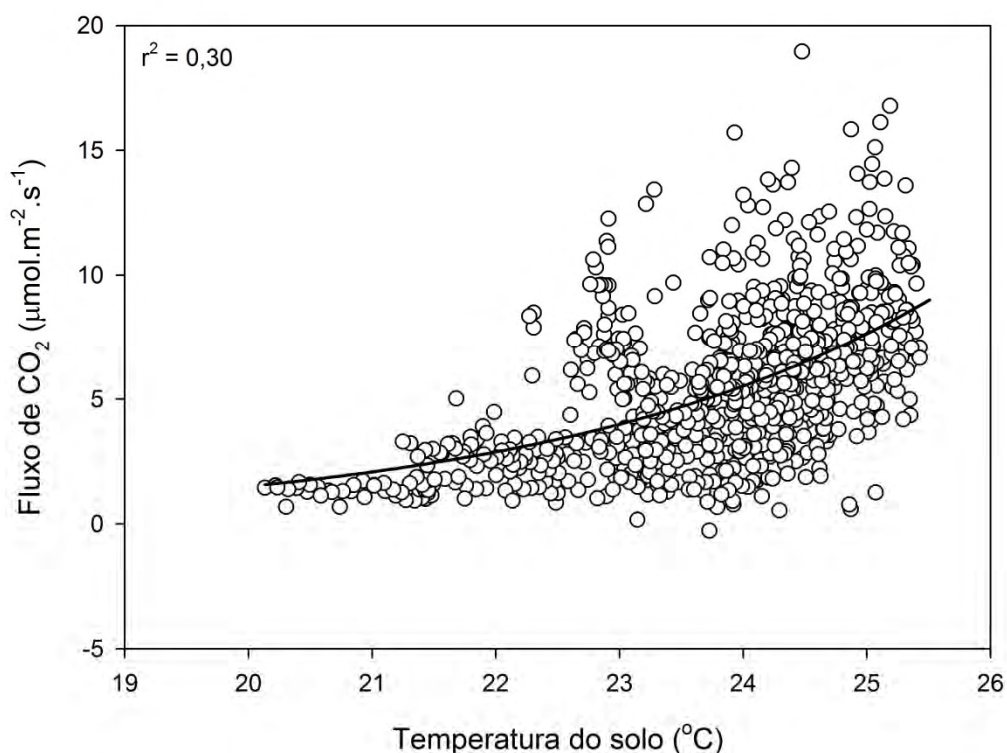


Figura 31. Relação entre os valores horários da temperatura do solo à 10 cm de profundidade e do fluxo de CO₂ noturno ao longo do ciclo da cultura.

4.4.1. Efeitos da Nebulosidade na Absorção do CO₂

A contribuição da radiação difusa na absorção de CO₂ tem se mostrado muito importante, como foi observado nos estudos de Gu et al. (1999), Gu et al. (2002), Urban et al. (2007) e Mercado et al. (2009). Na Figura 32 é apresentada a relação entre o índice de claridade e o fluxo de carbono diário no período de 61 a 98 DAE, no qual o IAF obteve pouca variação. Na presente pesquisa foi encontrado comportamento bem semelhante aos estudos anteriores, com máxima absorção de carbono em condições intermediárias de nebulosidade, obtendo coeficiente de determinação de 0,55.

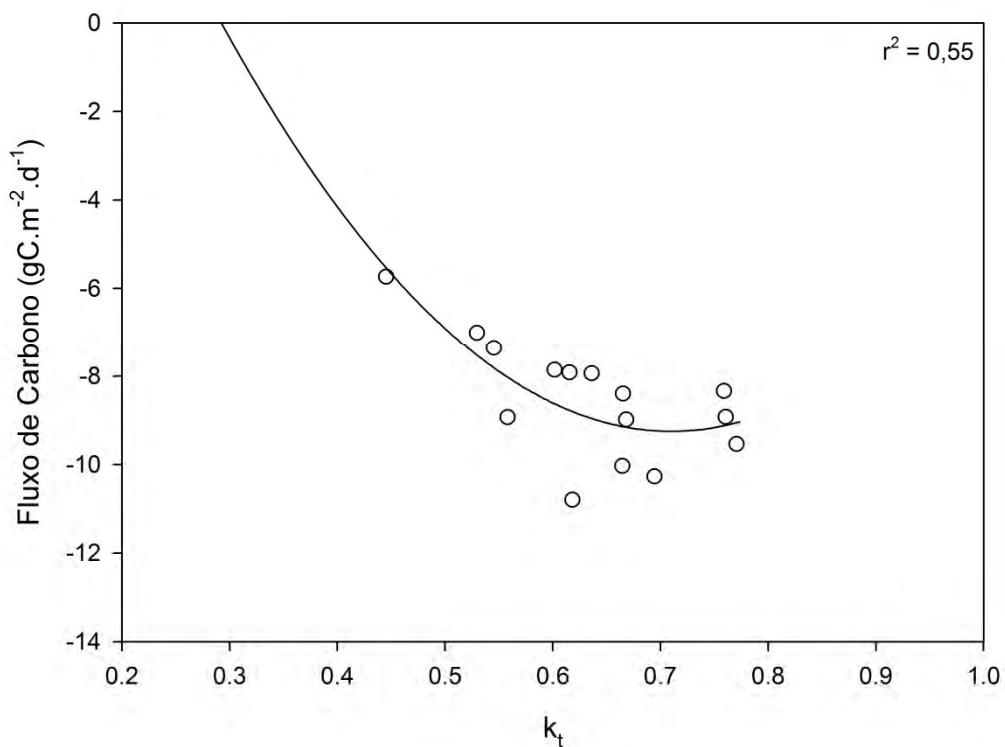


Figura 32. Relação entre o índice de claridade e o fluxo de carbono no período de 61 a 98 DAE.

No período analisado, de 61 a 98 DAE, o IAF não demonstrou grande influência nas trocas de carbono ($r^2 = 0,06$), mesmo tendo variado de 3,37 a 4,43 $m^2.m^{-2}$ (Figura 33), possibilitando a avaliação dos efeitos da nebulosidade nas trocas de carbono.

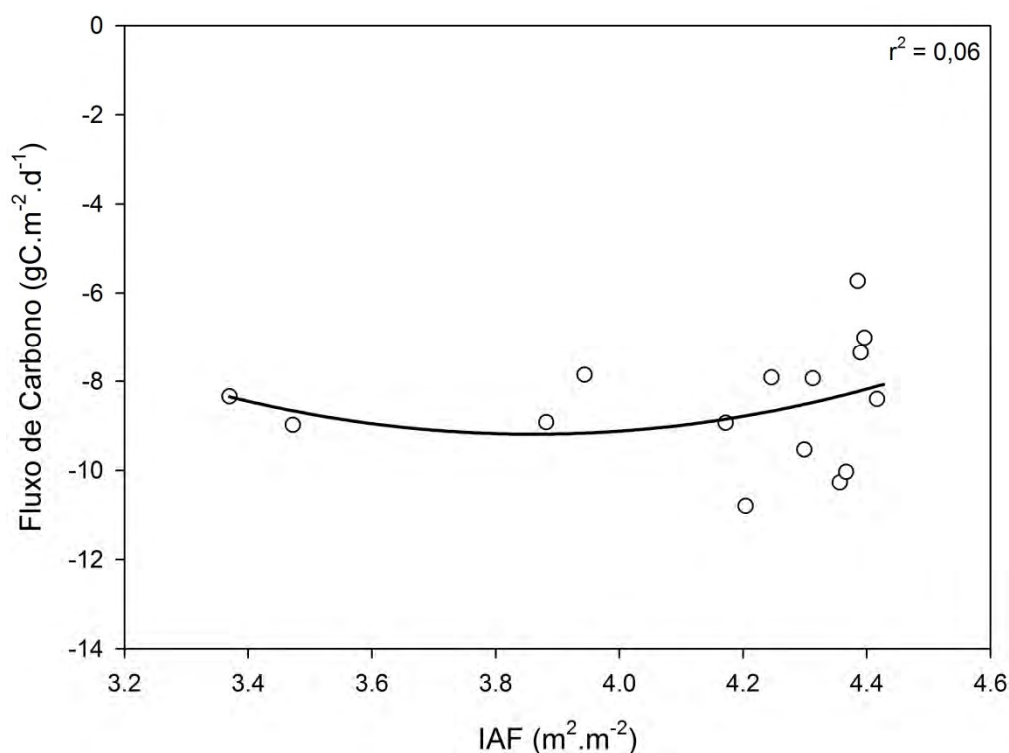


Figura 33. Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o fluxo de carbono no período de 61 a 98 DAE.

Para avaliar os efeitos da nebulosidade nas trocas de CO₂ pela cultura do milho, foram utilizados nove dias de dados do período entre 61 e 98 DAE (Tabela 8), os quais foram separados em três classes de cobertura de nuvens: primeira (C1), k_t variando entre 0,5 e 0,6; segunda (C2), k_t variando entre 0,6 e 0,7; e terceira (C3), k_t variando entre 0,7 e 0,8. Os dias utilizados foram escolhidos devido à proximidade nas condições de umidade do solo. A C1 apresentou uma diminuição de aproximadamente 13% do fluxo de carbono em relação a C3, acompanhando a redução de cerca de 27% da PAR_{in}. Na C2, apesar das menores quantidades de umidade do solo (cerca de 12,2%) e da PAR_{in} (aproximadamente 12%), devido à maior cobertura de nuvens, o fluxo de carbono foi cerca de 16% superior em relação a C3, o que provavelmente ocorreu devido a maior absorção de CO₂ encontrada em dias mais nublados, menor k_t , para uma mesma quantidade de PAR_{in} (Figura 34). Essa maior absorção do CO₂ em dias mais nublados ocorre provavelmente devido à maior quantidade de radiação que chega a níveis mais baixos do dossel, uma vez que para que a mesma quantidade de

PAR_{in} obtida em dias claros ocorre em dias nublados geralmente o sol deve estar em elevações maiores, o que favorece a penetração da radiação no dossel (GU et al., 1999)

Tabela 8. Valores diários do índice de claridade (k_t), fluxo de carbono (F_c), índice de área foliar (IAF), radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e umidade do solo (U_{solo})

Classe	Dia Juliano	DAE	k_t	F_c (gC.m ⁻² .d ⁻¹)	IAF (m ² .m ⁻²)	PAR _{in} (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	U_{solo} (m ³ .m ⁻³)
C1	355	73	0,56	-8,93	4,17	11,12	0,45
	3	86	0,55	-7,35	4,39	10,29	0,39
	4	87	0,53	-7,00	4,40	10,33	0,41
C2	356	74	0,62	-10,79	4,20	12,07	0,43
	364	82	0,69	-10,27	4,36	13,46	0,33
	365	83	0,66	-10,03	4,37	12,81	0,32
C3	343	61	0,76	-8,34	3,37	14,34	-
	349	67	0,76	-8,92	3,88	14,48	0,44
	360	78	0,77	-9,53	4,30	14,62	0,38

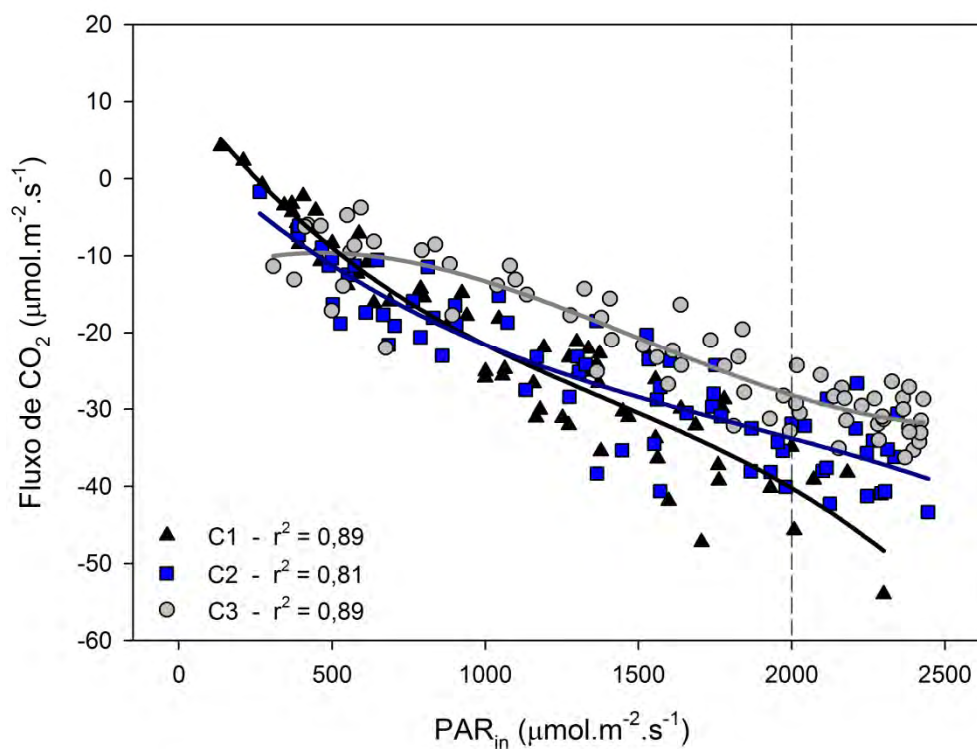


Figura 34. Relação entre a PAR_{in} e o fluxo de CO₂ nas três classes avaliadas.

Adicionalmente, o aumento da radiação difusa, devido ao espalhamento da radiação pelas nuvens, ocasiona o melhor aproveitamento da radiação disponível, uma vez que a radiação é melhor distribuída ao longo do dossel, alcançando as folhas inferiores do dossel, as quais são mais eficientes no uso da radiação (URBAN et al., 2007). Além disso, outros fatores podem estar contribuindo para a maior absorção de CO₂ em dias mais nublados, como, por exemplo, o Δe , que tende a diminuir com as condições de nebulosidade (FREEDMAN et al., 2001). Segundo Collatz et al. (1991) a diminuição do Δe induz a abertura dos estômatos, aumentando a absorção de CO₂ pelas folhas.

Na Figura 35 são apresentadas as relações entre a PAR_{in} e a PAR_{inb} nas três classes avaliadas. A quantidade de PAR_{in} necessária para que haja maior PAR_{inb} em dias claros se eleva à medida que a nebulosidade aumenta, sendo necessários valores da PAR_{in} superiores a 960 e 1.310 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para que a PAR_{inb} na C3 seja maior que na C2 e na C1, respectivamente.

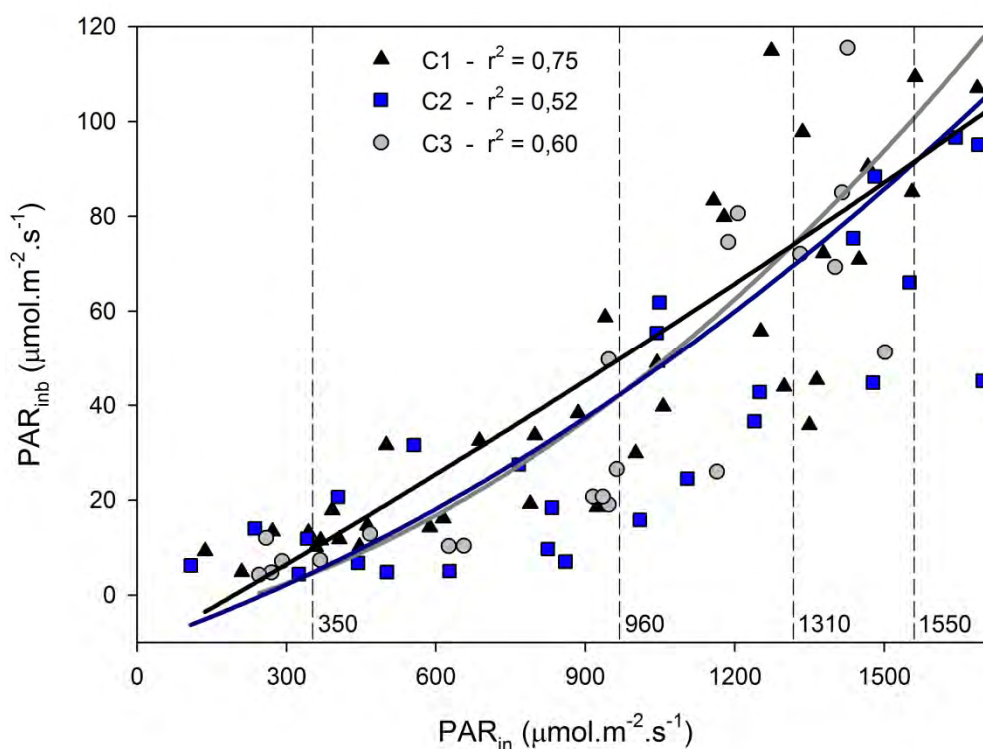


Figura 35. Relação entre a PAR_{in} e a PAR_{inb} nas três classes avaliadas.

Essa maior quantidade de radiação que chega à base do dossel em dias mais nublados pode ocorrer por dois motivos principais: Primeiro, em geral, para que a mesma quantidade de PAR_{in} obtida em dias claros ocorra em dias nublados geralmente o sol deve estar em elevações maiores, o que favorece a penetração da radiação no dossel, como já foi mencionado anteriormente. Segundo, em dias mais nublados pode ocorrer um fenômeno chamado de *cloud gap effect*, em inglês, que tende a aumentar a quantidade de radiação que chega a um determinado ponto na superfície em períodos em que não há nuvens entre este ponto no solo e o sol, uma vez que a radiação direta que chega nesse momento é a mesma que chegaria em dias claros, entretanto, a radiação difusa aumenta, devido ao espelhamento e reflexão da radiação pelas nuvens ao redor. Deve-se ressaltar que essas relações apresentadas não foram obtidas com os mesmos dias utilizados para avaliar os efeitos da nebulosidade nas trocas de CO_2 , devido a problemas no armazenamento dos dados pelo datalogger CR23X, os quais impediram a obtenção dos dados de PAR_{inb} .

Na Figura 36 são apresentadas as relações entre o índice de claridade e o fluxo de CO_2 nas três classes avaliadas. Na C2 a maior absorção do CO_2 ocorreu próximo do k_t de 0,74 devido à maior contribuição da radiação difusa, enquanto que na C3 a maior absorção ocorreu com o k_t próximo de 0,78. Gu et al. (1999) encontraram maior absorção de carbono em condições de céu nublado, com valores do k_t variando entre 0,4 e 0,6 em duas florestas, uma boreal e a outra decíduo-temperada. Os menores valores do k_t encontrados pelos pesquisadores em que a absorção do carbono foi máxima devem-se, provavelmente, à arquitetura do dossel considerado, uma vez que no presente estudo o dossel do milho permite maior penetração da radiação devido as folhas do dossel superior ser inclinadas, possibilitando maior contribuição da radiação direta na fotossíntese do dossel inferior.

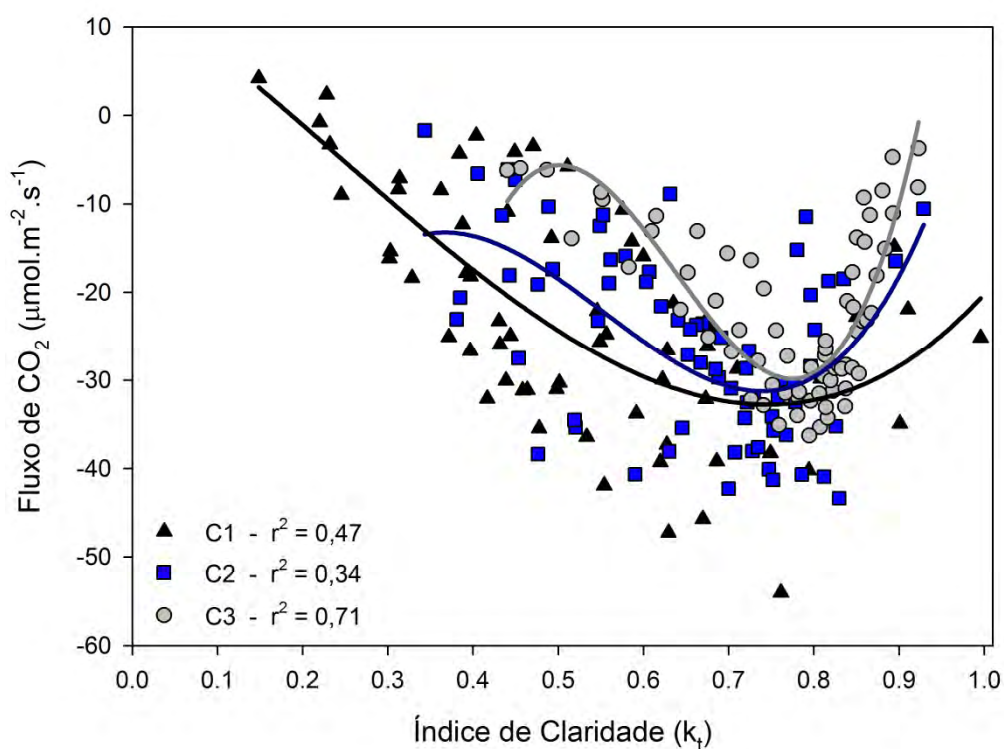


Figura 36. Relação entre o índice de claridade e o fluxo de CO₂ nas três classes avaliadas.

Em relação ao ciclo médio horário do fluxo de CO₂ (Figura 37), foi observado maior variabilidade na absorção do CO₂ na classe C1, provavelmente ocasionada pela variabilidade da PAR_{in}, a qual é influenciada pela passagem de nuvens. A classe C1 obteve o maior pico de absorção de CO₂, porém as emissões noturnas também foram superiores, ocasionadas provavelmente pelas maiores temperaturas do ar e umidade do solo, as quais aumentam a respiração (LAW et al., 2002), que resultou ao final na menor absorção diária de CO₂, apesar dos fluxos diurnos de CO₂ na classe C3 terem sido inferiores.

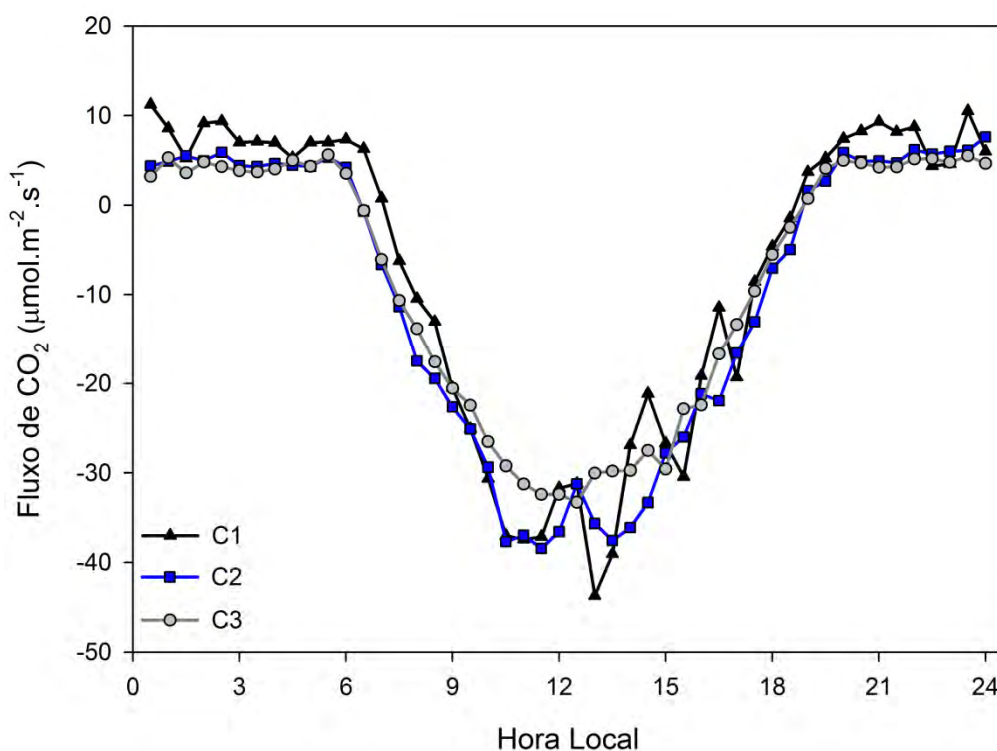


Figura 37. Ciclo médio horário do fluxo de CO₂ nas três classes avaliadas.

4.5. Balanço de Energia

O fechamento do balanço de energia para todo o ciclo da cultura apresentou coeficiente de inclinação da reta de 0,82, com coeficiente de determinação de 0,96 (Figura 38). O valor da inclinação da reta encontrado no presente estudo está bem próximo dos obtidos por Suyker e Verma (2010) ($0,88 \pm 0,04$) em sistema de rotação milho-soja, Li et al. (2008) (0,93) para a cultura do milho, Meyers e Hollinger (2004) (0,84;0,90) para as culturas do milho e da soja, respectivamente. Em estudo sobre o fechamento do balanço de energia para diversos tipos de cobertura de vegetação, Wilson et al. (2002) encontraram uma variação de 0,53 a 0,99 nos coeficientes de inclinação da reta.

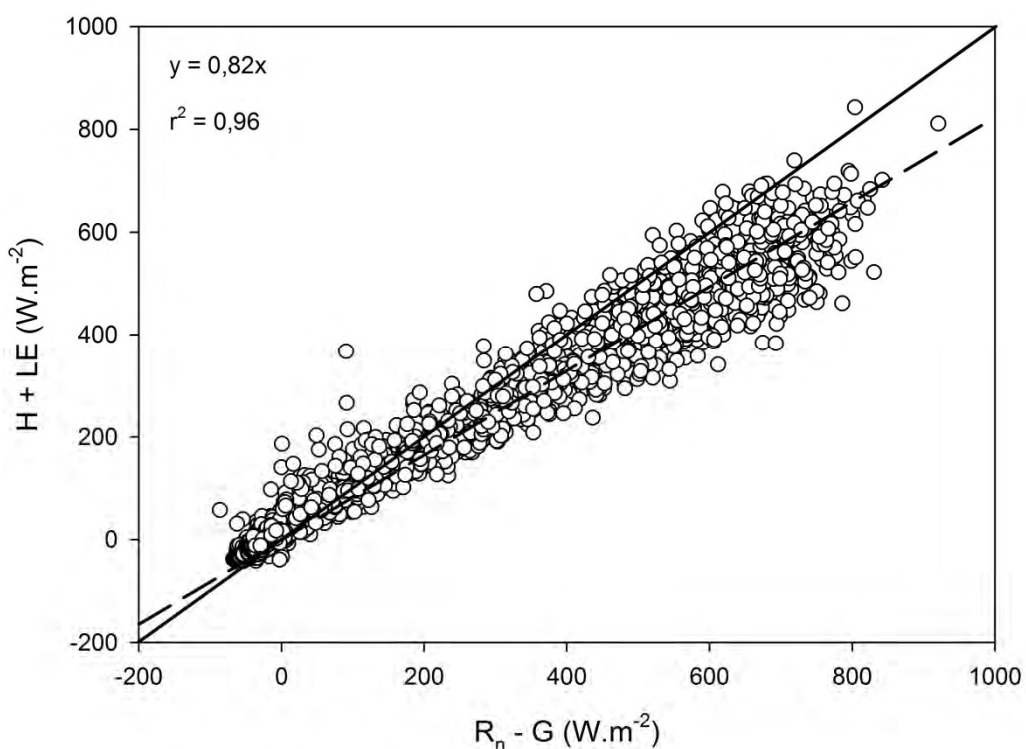


Figura 38. Fechamento do balanço de energia para valores horários ao longo do ciclo da cultura.

Na Figura 39 são apresentados os resultados dos fluxos de calor sensível (H), latente (LE) e no solo (G). À medida que a cultura se desenvolveu, ocorreu o rápido aumento do LE, devido ao aumento da transpiração causado pela maior área foliar. O LE atingiu valor máximo de $15,52 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 78 DAE, o que equivale a $6,33 \text{ mm.d}^{-1}$ em termos de evapotranspiração (Figura 40). Esse valor é bem próximo aos encontrados por Cunha et al. (1996) sobre cultura de milho em Taquari – RS ($16,53 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) e por Suyker e Verma (2010) para a cultura de milho em Nebraska – EUA ($6,3 \text{ mm.d}^{-1}$).

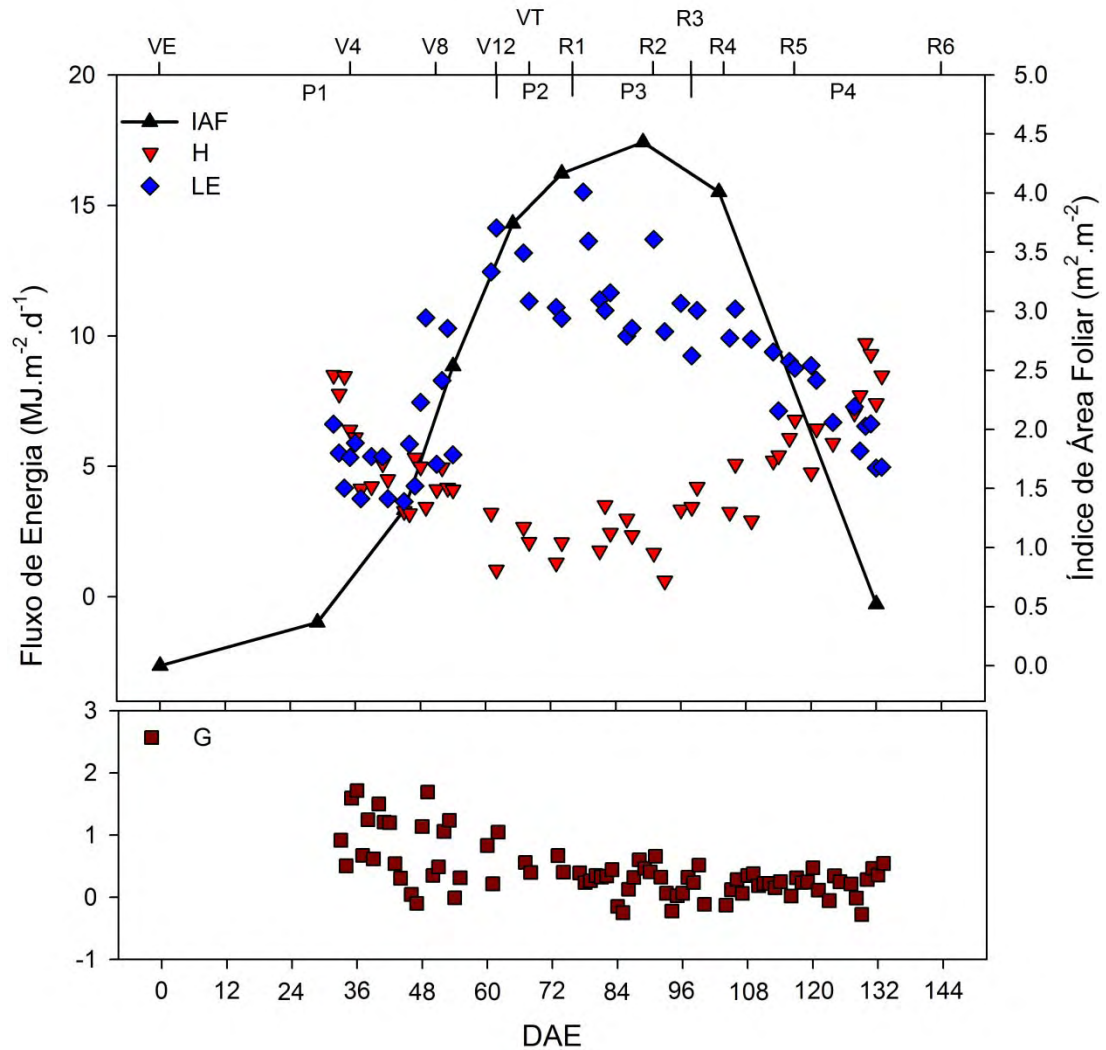


Figura 39. Fluxos de calor sensível (H), latente (LE) e no solo (G) ao longo do ciclo da cultura.

Em virtude do aumento do consumo de energia para a evapotranspiração, o H apresentou uma tendência de diminuição com o aumento do IAF, atingindo valor mínimo de $0,61 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 93 DAE. Com o início da senescência, ocorreu o aumento do H devido à diminuição do consumo da energia disponível para a evapotranspiração, alcançando valores máximos de $9,71 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 130 DAE, final do ciclo da cultura. Por sua vez, o G apresentou tendência de diminuição à medida que a cobertura do solo aumentava, obtendo valores máximos no início do ciclo da cultura, quando a cultura se encontrava com menor IAF, atingindo $1,72 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ aos 36 DAE. Ao final do ciclo da cultura ocorreu leve tendência de aumento do G. Resultados semelhantes foram obtidos por Kar e Kumar

(2010) ao avaliarem o comportamento do balanço de energia em uma cultura de milho na Índia.

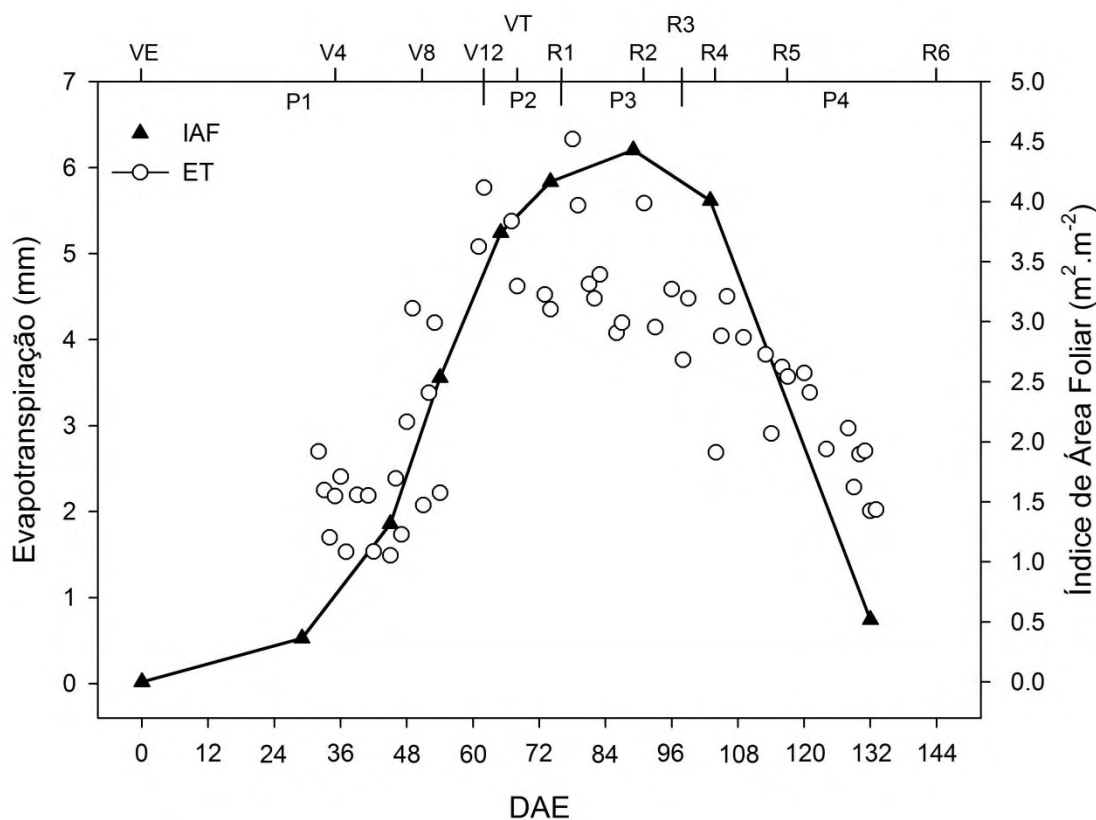


Figura 40. Evapotranspiração (ET) ao longo do ciclo da cultura.

Em média, apesar do IAF ter sido mais elevado no período P3, a evapotranspiração foi maior no período P2 ($4,93 \text{ mm.d}^{-1}$) (Tabela 9), acompanhando a maior disponibilidade de água no solo nesse período, enquanto que o menor valor foi obtido no período P1, quando a cultura se encontrava com menor IAF. Suyker e Verma (2008) relatam que o IAF é um fator limitante para a evapotranspiração, principalmente no início do ciclo da cultura, quando está ocorrendo a expansão foliar. Entretanto, resultados obtidos pelos autores sugerem um valor limite do IAF, entre 3 e 4, a partir do qual a evapotranspiração deixa de sofrer efeito direto da cobertura foliar, uma vez que a partir do fechamento completo do dossel não há aumento relativo na radiação interceptada.

O H obteve menor valor no período P2 ($1,84 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), enquanto que o maior valor ocorreu no período P4 ($6,07 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$). Por sua vez, o G obteve menor valor no período P4 ($0,22 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), provavelmente devido a

maior cobertura do solo, bem como a diminuição do R_n , enquanto que o maior valor foi encontrado no período P1 ($0,67 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), no qual o IAF da cultura se apresentava menor, possibilitando a maior incidência de radiação na superfície do solo.

Tabela 9. Valores do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e evapotranspiração (ET)

Período	R_n ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	H ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	LE ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	G ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	ET (mm.d^{-1})
P1	13,47	5,05	6,28	0,67	2,56
P2	15,92	1,84	12,08	0,61	4,93
P3	16,23	1,91	11,86	0,26	4,84
P4	15,27	6,07	7,98	0,22	3,26

Com relação à partição do saldo de energia (Figura 41), observa-se que a maior fração do R_n destinada à evapotranspiração (LE/R_n) não ocorreu quando o IAF da cultura foi máximo, havendo diminuição do LE/R_n próximo ao período de máximo IAF, possivelmente ocasionada pela menor umidade do solo. A fração LE/R_n variou de 0,28 (34 DAE) a 0,87 (78 DAE), apresentando menores valores no início e no final do ciclo da cultura. Resultados semelhantes foram obtidos por Suyker e Verma (2008), que encontraram uma variação de LE/R_n em torno de 0,2 no início do ciclo da cultura, quando o solo estava descoberto, e máximos em torno de 0,9 quando o dossel estava completamente fechado ($IAF > 3$). Por outro lado, a fração do R_n destinada ao aquecimento do ar (H/R_n) apresentou comportamento contrário àqueles do LE/R_n , com maiores valores no início e no final do ciclo da cultura, bem como tendência de diminuição à medida que o IAF da cultura aumentou, variando de 0,05 (93 DAE) a 0,64 (130 DAE). Quanto ao solo, a fração do R_n destinada ao seu aquecimento (G/R_n) obteve gradual diminuição ao longo do ciclo da cultura, variando de 0,13 (42 DAE) a 0,001 (116 DAE).

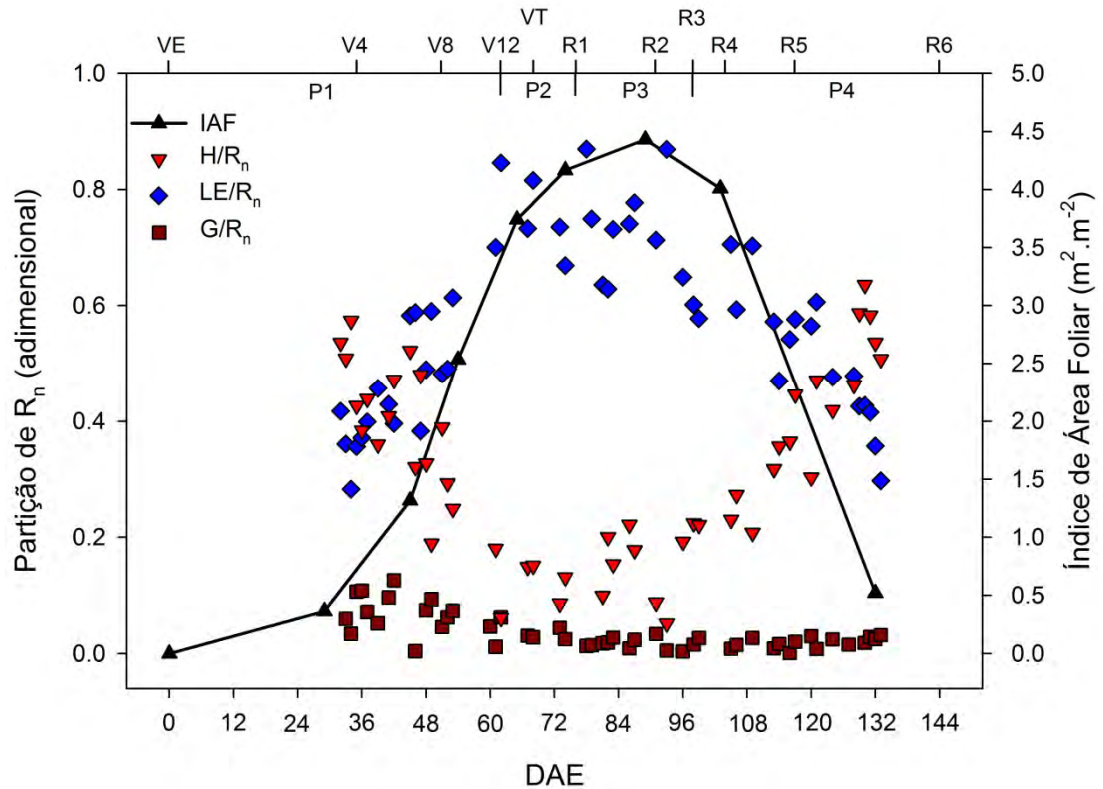


Figura 41. Partição do saldo de energia para os fluxos de calor sensível (H/R_n), calor latente (LE/R_n) e calor no solo (G/R_n) ao longo do ciclo da cultura.

Comparando-se os resultados nos períodos, a maior fração H/R_n ocorreu no período P4, no qual 39,75% da energia disponível foram utilizados para o aquecimento do ar (Tabela 10), enquanto que a menor fração H/R_n foi observada no período P2 (11,56%), no qual 75,88% do saldo de radiação foram utilizado para a evapotranspiração, sendo este o período com maior LE/R_n . O menor IAF no período P1 ocasionou em menor fração LE/R_n (46,62%), bem como maior incidência de radiação na superfície do solo, resultando em maior aquecimento do solo, e, conseqüentemente, maior fração G/R_n . A menor fração G/R_n ocorreu no período P4, provavelmente pela deposição de palha sobre a superfície do solo, reduzindo a incidência de radiação.

Tabela 10. Partição do saldo de radiação entre os fluxos de calor sensível (H/R_n), calor latente (LE/R_n) e calor no solo (G/R_n)

Período	H/R_n (%)	LE/R_n (%)	G/R_n (%)
P1	37,49	46,62	4,97
P2	11,56	75,88	3,83
P3	11,77	73,07	1,60
P4	39,75	52,26	1,44

Para melhor avaliar a influência do IAF nos fluxos de H, LE e G, foram realizadas regressões entre o IAF e os fluxos de energia normalizados com o R_n , a fim de retirar a influência nos fluxos de energia causada pela variabilidade do R_n . Foram encontradas relações lineares entre o IAF e as razões H/R_n , LE/R_n e G/R_n , com coeficientes de determinação de 0,67, 0,73 e 0,30, respectivamente (Figura 42), indicando forte dependência dos fluxos de energia em relação ao IAF da cultura, principalmente para os fluxos de calor sensível e calor latente. Em estudo sobre a evapotranspiração em cultivo de milho na China, Li et al. (2008) encontraram uma relação linear entre o IAF e a evapotranspiração diária, a qual obteve r^2 de 0,46. Os autores relataram que a evapotranspiração foi influenciada principalmente pelo R_n , o qual explicou 67% da variabilidade diária da evapotranspiração.

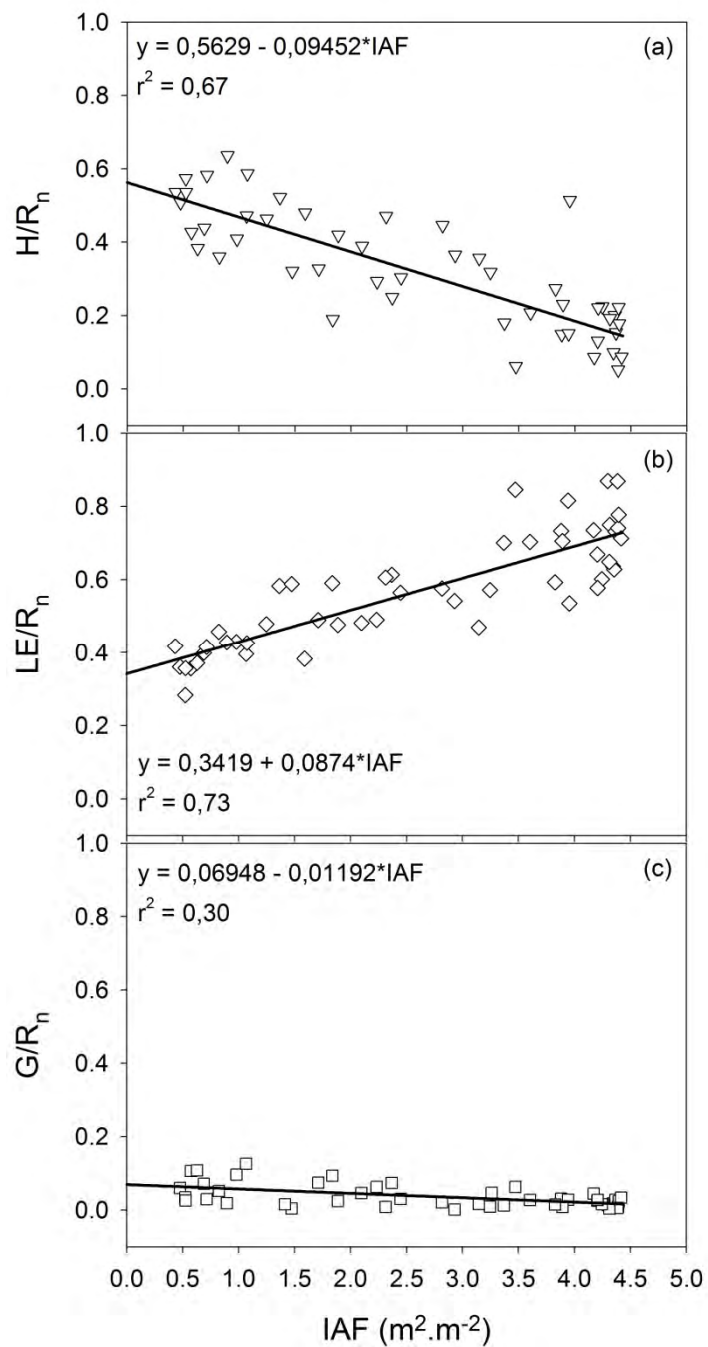


Figura 42. Relação entre os valores diários do índice de área foliar (IAF) e das frações H/R_n (a), LE/R_n (b) e G/R_n (c).

A influência do R_n nos fluxos de H e LE foi avaliada para cada período utilizando valores horários. O R_n apresentou relação linear tanto com o H (Figura 43) quanto com o LE (Figura 44), com r^2 variando de 0,77 a 0,87 e de 0,75 a 0,94, respectivamente, evidenciando a forte influência que o R_n tem sobre os fluxos de H e LE em cultivo de milho. Os fluxos de calor

sensível obtiveram maiores coeficientes de determinação nos períodos P1 e P4, os quais obtiveram maiores inclinações da reta, 0,37 e 0,4, respectivamente, em relação aos períodos P2 e P3. Por outro lado, os fluxos de calor latente foram melhor correlacionados ao saldo de radiação nos períodos P2 e P3, em que não há grandes variações no IAF, bem como ocorre maior partição do R_n para a evapotranspiração, como pode ser observado pelos maiores valores dos coeficientes angulares da reta, 0,49 e 0,51, respectivamente.

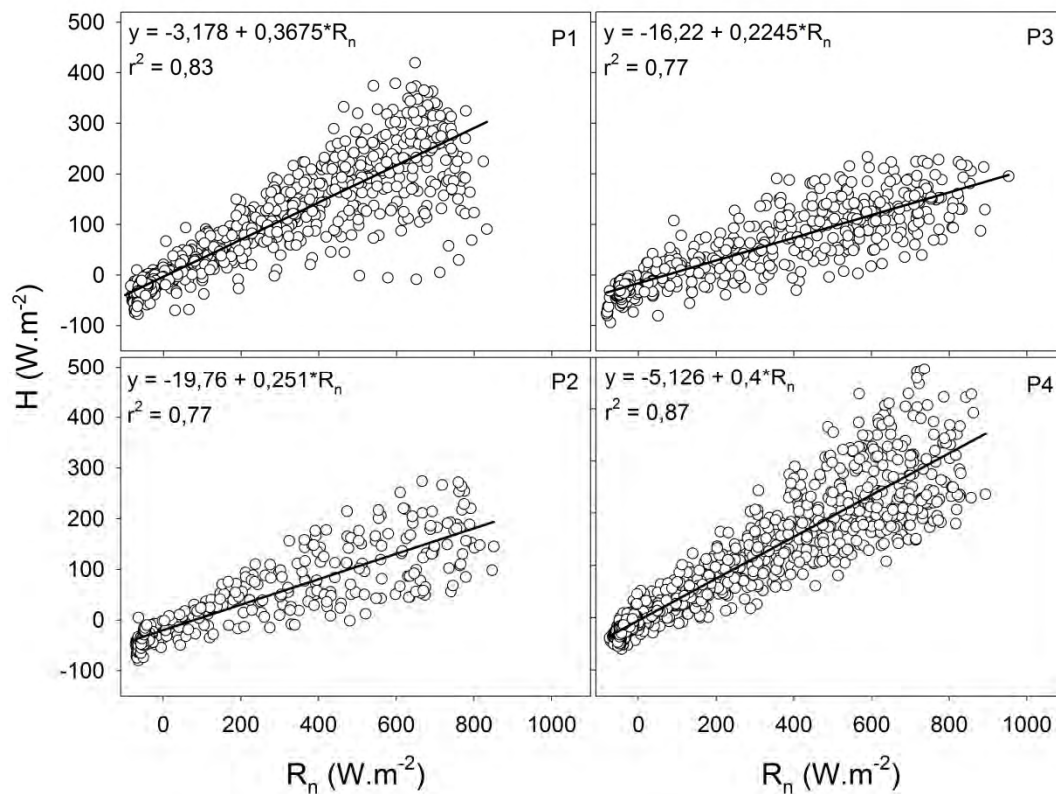


Figura 43. Relação entre os valores horários do saldo de radiação (R_n) e do fluxo de calor sensível (H).

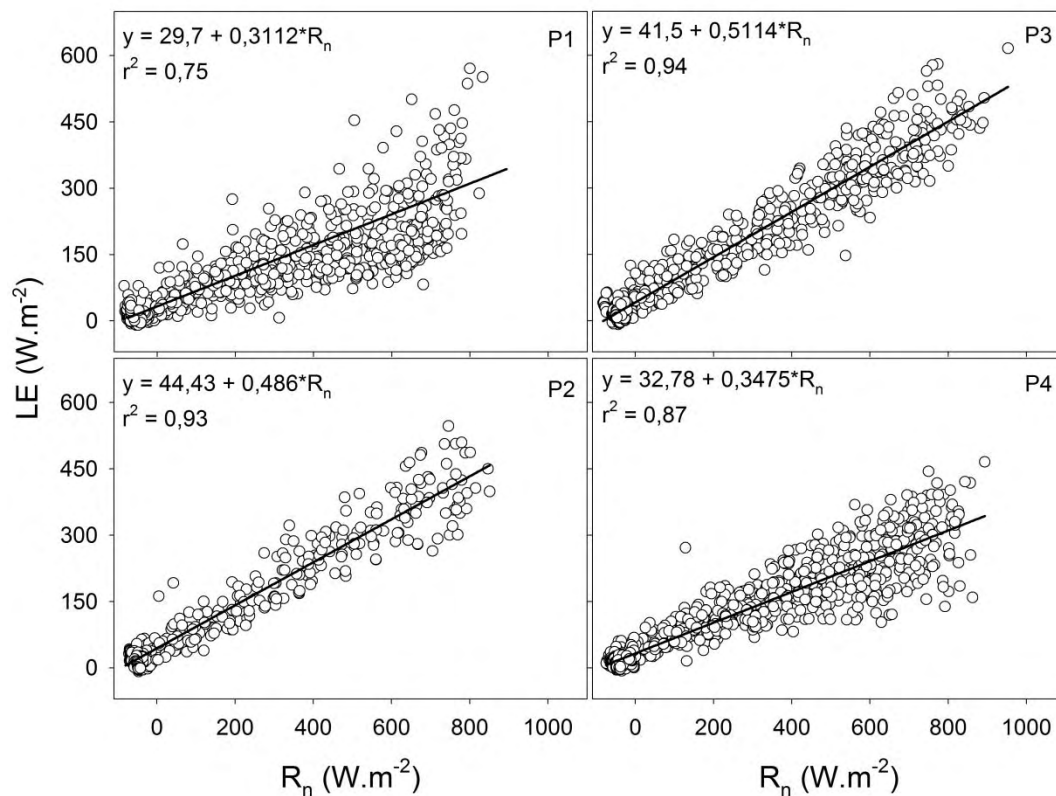


Figura 44. Relação entre os valores horários do saldo de radiação (R_n) e do fluxo de calor latente (LE).

Na Figura 45 são apresentadas as relações entre a temperatura do ar e o fluxo de calor sensível para os períodos P1, P3 e P4. Os fluxos de calor sensível apresentaram relação exponencial com a temperatura do ar, com r^2 de 0,15 (P1), 0,27 (P3) e 0,32 (P4), estando estes resultados em concordância com os encontrados por Li et al. (2008), os quais encontraram uma relação exponencial entre valores diários de temperatura do ar e do fluxo de calor sensível, com r^2 de 0,40. Foram observadas maiores dispersões dos valores de H nos períodos P1 e P4, ocasionadas, provavelmente, pela grande variabilidade do IAF nesses períodos, uma vez que para mesma temperatura do ar, os valores de H são menores com IAF mais elevado. Nos períodos P1 e P4 foram observadas também aumentos mais acentuados do H com a elevação da temperatura do ar, o que ocorre, provavelmente, devido a maior fração do R_n destinado ao H, principalmente no início do período P1 e no final do período P4.

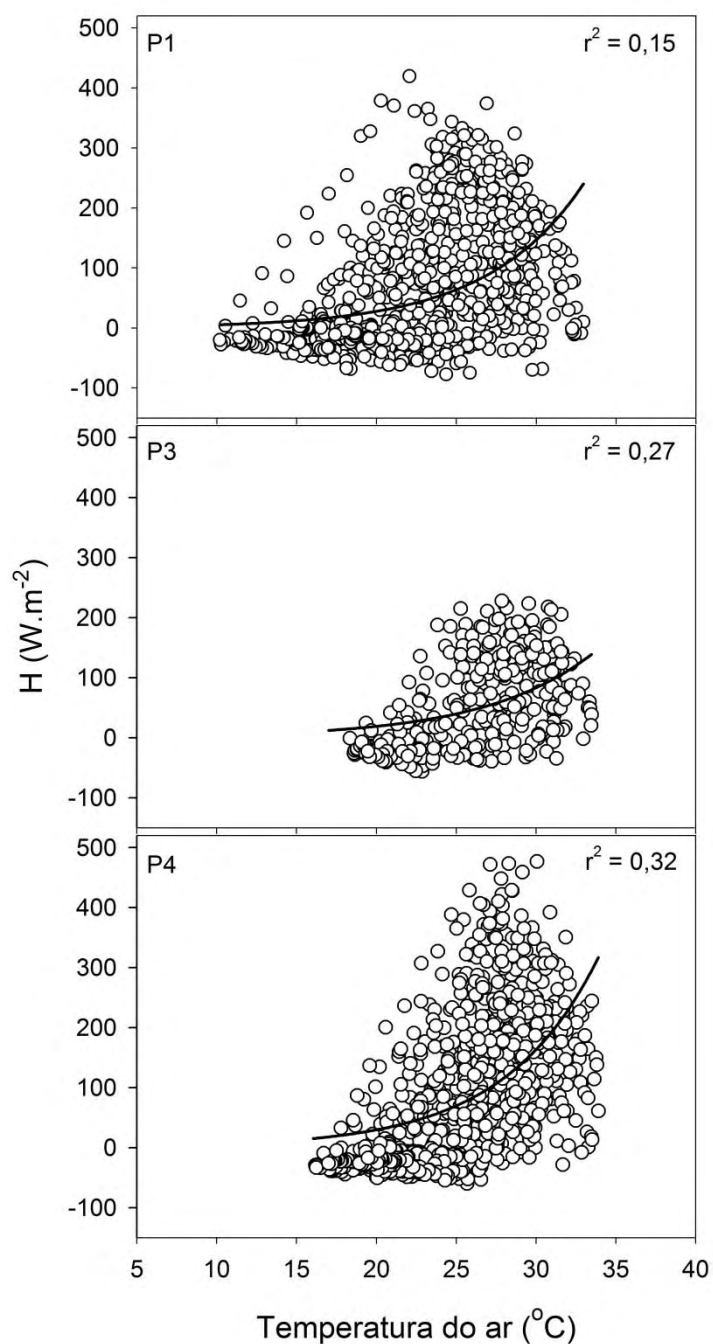


Figura 45. Relação entre os valores horários da temperatura do ar e do fluxo de calor sensível (H) para os períodos P1, P3 e P4.

Na Figura 46 são apresentadas as relações entre os fluxos de calor latente e o déficit de pressão de vapor para os períodos P1, P3 e P4. Foram observadas relações lineares entre o LE e o Δe , com r^2 de 0,41 (P1), 0,67 (P3) e 0,61 (P4), sendo esses valores menores do que os encontrados nas

relações entre o LE e o R_n , evidenciando a dominância do R_n na variabilidade do LE.

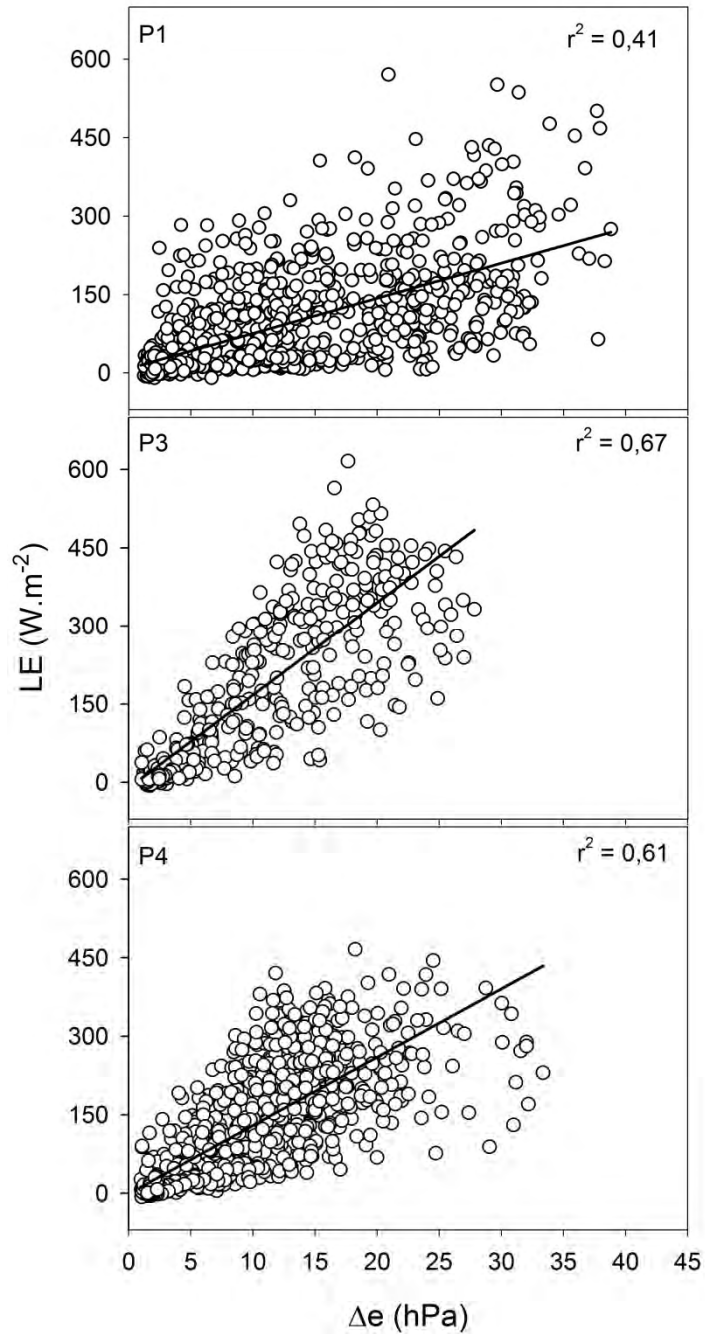


Figura 46. Relação entre os valores horários do déficit de pressão de vapor (Δe) e do fluxo de calor latente (LE) para os períodos P1, P3 e P4.

A razão de Bowen (β), razão entre H e LE, variou entre 0,32 (49 DAE) e 2,0 (34 DAE) no início do estágio vegetativo, quando o dossel da cultura não estava completamente fechado (IAF < 3,0) (Figura 47). Após o fechamento do dossel, a variação da razão de Bowen foi de 0,06 (93 DAE) a 0,38 (99 DAE), até o início da senescência da cultura, a partir da qual obteve variação de 0,30 (109 DAE) a 1,71 (133 DAE). Estes resultados são próximos aos encontrados por Suyker e Verma (2008), os quais obtiveram valores da razão de Bowen menores que 0,35 quando o dossel da cultura estava completamente fechado (IAF > 3,0), e por Kar e Kumar (2010), que encontraram variações da razão de Bowen entre 0,11 e 0,17 quando o IAF da cultura foi máximo e de 0,41 a 1,18 no início do estágio vegetativo e de senescência da cultura.

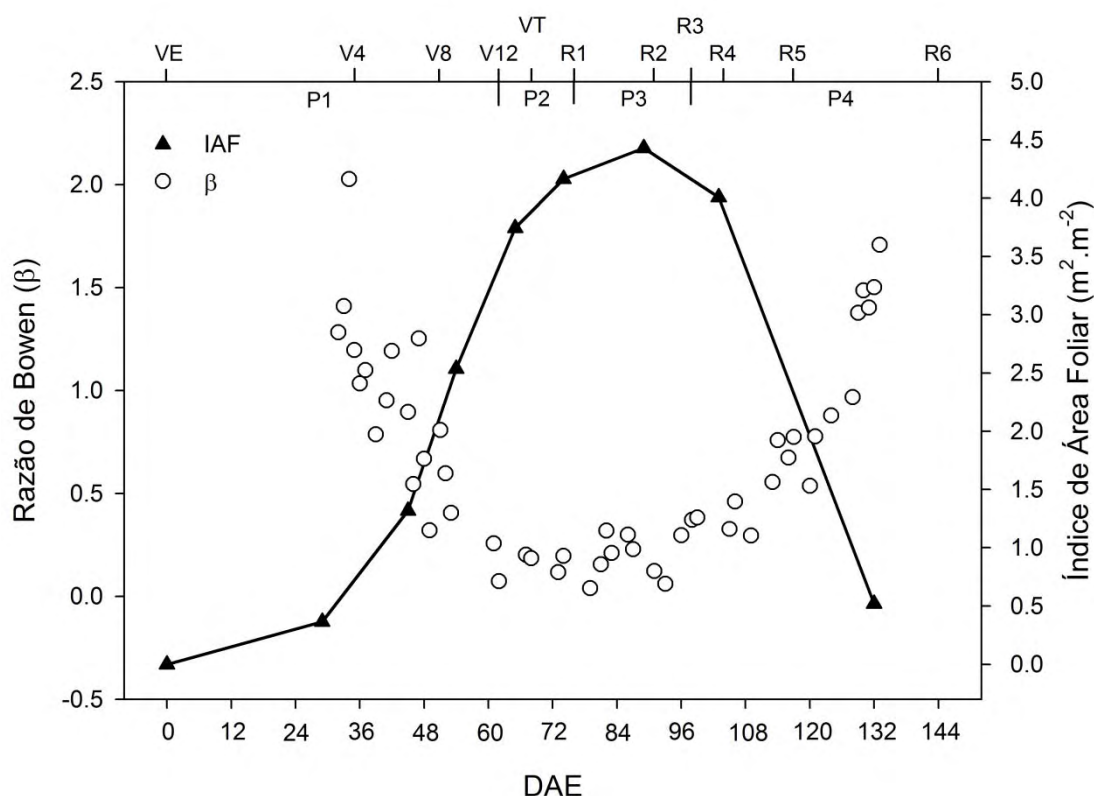


Figura 47. Razão de Bowen (β) ao longo do ciclo da cultura.

A razão de Bowen apresentou boa relação com o IAF (Figura 48), havendo tendência de diminuição à medida que o IAF se elevou, com r^2 de 0,76. Esse comportamento da razão de Bowen em relação ao IAF deve-se às relações existentes entre os fluxos de calor sensível e calor latente com o

IAF, em que o H tende a diminuir com o aumento do IAF e o LE tende a ser maior.

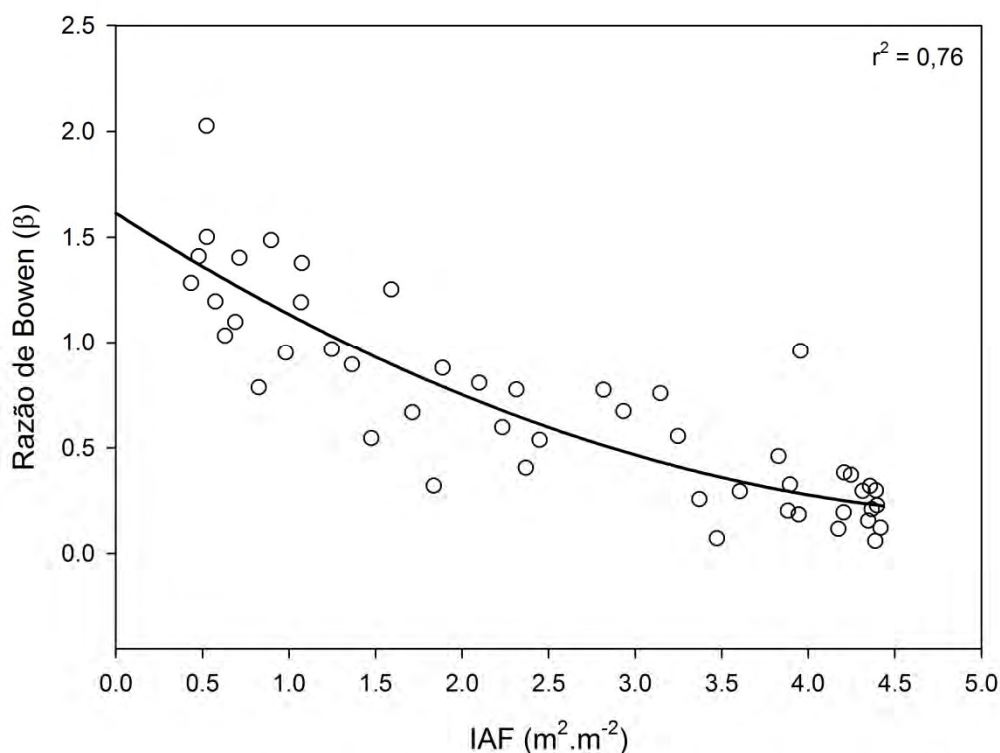


Figura 48. Relação entre o índice de área foliar (IAF) e a razão de Bowen (β).

4.5.1. Variabilidade horária

O R_n obteve valores máximos de $588,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P1), $587,26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P2), $667,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P3) e $586,31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P4) ocorrendo entre 11 e 13 horas (Figura 49), resultando em valores máximos de H de $229,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P1), $148,89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P2), $146,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P3) e $257,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P4) entre 11 e 12 horas e de LE entre 13 e 14 horas, com valores de $216,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P1), $406,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P2), $403,31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P3) e $257,06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P4), que equivale a $0,32$, $0,6$, $0,59$ e $0,38 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente. Esses valores de LE estão bem próximos dos encontrados por Li et al. (2008) nos estádios entre o V6 e o R1 ($0,39 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), embonecamento ($0,62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), enchimento de grãos ($0,54 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) e maturação ($0,42 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$). Por sua vez, o G apresentou máximos de $85,95 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P1), $81,79 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P2), $72,41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P3) e $42,27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (P4) as 12:30 horas.

Em média, o H apresentou-se aproximadamente 11% mais elevado no período da manhã (6 às 12 horas), em relação ao período da tarde (12 às 18 horas), enquanto que o LE foi cerca de 26,6% maior no período da tarde em relação ao período da manhã, ocasionado pelo maior saldo de radiação (20,7%), devido à menor cobertura de nuvens nesse período. O fluxo de calor no solo apresentou-se aproximadamente 58,8% mais elevado no período da tarde, devido a maior incidência de radiação.

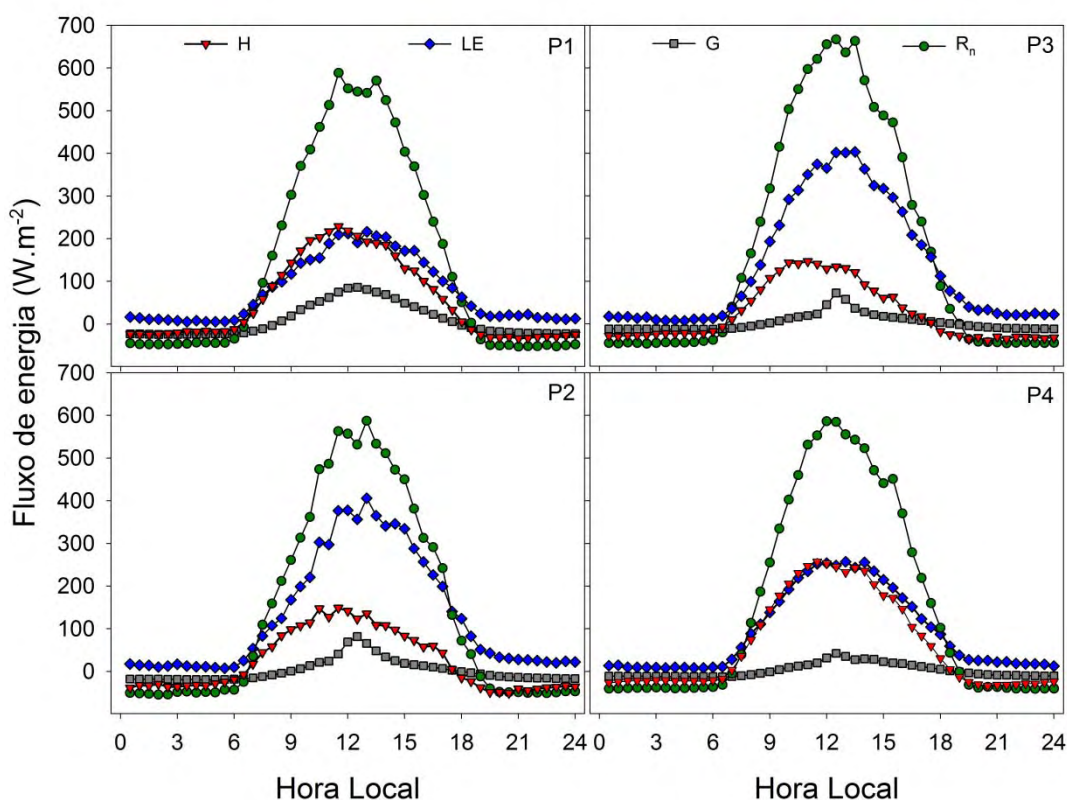


Figura 49. Ciclo médio diário do saldo de radiação (R_n) e dos fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e calor no solo (G) nos períodos P1, P2, P3 e P4.

Na Figura 50 são apresentados os ciclos médio diários da razão de Bowen nos períodos P1, P2, P3 e P4. A razão de Bowen apresentou valores mínimos de -3,45 (P1), -3,28 (P2), -2,99 (P3) e -2,71 (P4) entre 4 e 6 horas, havendo acentuado aumento no início da manhã, com máximos de 1,31 (10:30), 0,67 (8:30), 0,58 (8:30) e 1,08 (9:30) nos períodos P1, P2, P3 e P4, respectivamente, e uma gradual diminuição ao longo do dia após o pico máximo. O comportamento da razão de Bowen ao longo do dia obtido no presente estudo também foi observado por Kar e Kumar (2010), para o

cultivo de milho em Orissa – Índia. Entretanto, os valores obtidos pelos autores foram menores, com picos máximos da razão de Bowen de 0,42, no início do estágio de crescimento, de 0,30 quando o IAF foi máximo e de 0,40 na senescência. Em média, a razão de Bowen foi cerca de 41,5% inferior no período da tarde em relação ao período da manhã, ocasionado pelos menores valores do fluxo de calor sensível e aumento do fluxo de calor latente.

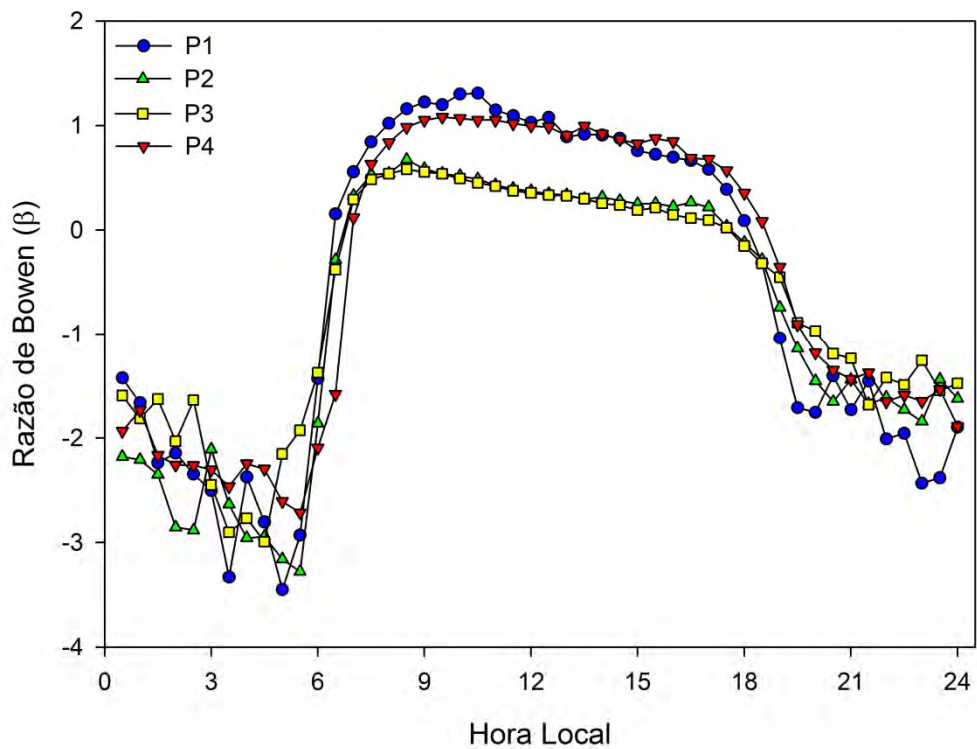


Figura 50. Ciclo médio diário da razão de Bowen (β) nos períodos P1, P2, P3 e P4.

5. CONCLUSÕES

A menor cobertura de nuvens no período da tarde proporcionou maiores quantidades de irradiância solar global incidente (S_{in}) e radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}), ocasionando em maiores valores da radiação fotossinteticamente ativa incidente na base do dossel (PAR_{inb}), irradiância solar global refletida (S_{out}), radiação fotossinteticamente ativa refletida (PAR_{out}), bem como da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (PAR_{abs}) e do saldo de radiação (R_n).

No período P1, a fração da PAR_{abs} (FAPAR) apresentou uma tendência de diminuição à medida que a elevação solar aumentava, enquanto que nos períodos P3 e P4 houve uma leve tendência de aumento ao longo do dia, ocasionada provavelmente pela maior quantidade de PAR_{inb} aliada ao maior poder de absorção das folhas do dossel inferior.

As variações horárias do fluxo de CO_2 diurno foram melhores correlacionadas com a PAR_{abs} , com coeficientes de determinação (r^2) variando entre 0,56 (P1) e 0,82 (P3), enquanto que para o déficit de pressão de vapor, o r^2 variou de 0,09 (P1) a 0,32 (P3). O fluxo de CO_2 noturno apresentou uma relação exponencial com a temperatura do solo a 10 cm de profundidade, enquanto que tanto o fluxo de CO_2 diurno quanto o noturno não apresentaram relação bem definida com a velocidade de fricção (u^*).

A magnitude dos fluxos de CO_2 da cultura apresentou dependência com relação à nebulosidade, havendo maior absorção de carbono a níveis intermediários de cobertura de nuvens, ocasionada pela maior quantidade de radiação que chega a níveis mais baixos no dossel, bem como melhor rendimento quântico da cultura.

O balanço de energia da cultura apresentou um bom fechamento, com inclinação da reta de 0,82 e r^2 de 0,96. Os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) obtiveram melhores correlações com o R_n , sendo observada uma relação linear tanto entre o H quanto entre o LE, com coeficientes de determinação variando entre 0,77 e 0,87 e entre 0,75 e 0,94, respectivamente. Os fluxos de calor sensível e calor latente também apresentaram boa correlação com o IAF, obtendo coeficientes de determinação de 0,67 e 0,73 entre o IAF e os fluxos de H e LE normalizados pelo R_n , respectivamente. O fluxo de calor latente foi responsável pela utilização da maior parte da energia disponível, principalmente nos períodos P2 (75,88%) e P3 (73,07%), em que o IAF da cultura foi maior. Nos períodos P1 e P4 o LE consumiu cerca de 46,62 e 52,26% do R_n , respectivamente. O fluxo de calor sensível foi responsável pela utilização de 37,49, 11,56 e 11,77 e 39,75% nos períodos P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Por sua vez, a fração da energia disponível destinada para aquecer o solo foi de 4,95, 3,83, 1,60 e 1,44% nos períodos P1, P2, P3 e P4, respectivamente.

A razão de Bowen apresentou boa relação com o IAF, havendo uma tendência de diminuição à medida que o IAF se elevou, obtendo r^2 de 0,76. A razão de Bowen apresentou uma variabilidade ao longo do dia bem definida, com valores mínimos ocorrendo entre 4 e 6 horas, havendo um acentuado aumento no início da manhã, com máximos entre 8:30 e 10:30 horas, e uma gradual diminuição ao longo do dia após o pico máximo.

Os resultados apresentados neste estudo aliados à modelagem podem contribuir para entendimento de como as mudanças climáticas influenciarão a cultura do milho. Entretanto, mais estudos em outras regiões, bem como com outras cultivares, devem ser realizados para uma melhor representatividade da cultura do milho no país.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDRICH, S. R.; SCOTT, W. O.; LENG, E. R. **Modern corn production**. 2^a ed. Champaign: A & L Publication. 1982. 371 p.

ANDERSON, D. E.; VERMA, S. B. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat exchanges of a grain sorghum canopy. **Boundary Layer Meteorology**, v. 34, p. 317-331, 1986.

ANDRADE, V. M. **Relações de dependência entre o fluxo de CO₂ e as variáveis meteorológicas na cultura de milho (*Zea mays L.*)**. 2009. 75 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ARAÚJO, A. C.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; RANDOW, C.; MANZI, A. O.; CULF, A. D.; GASH, J. H. C.; VALENTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 58-1–58-20, 2002.

ASSUNÇÃO, H. F.; ESCOBEDO, J. F.; CARNEIRO, M. A. C. Eficiência de uso da radiação e propriedades óticas da cultura do amendoim. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 3, p. 215-222, 2008.

AWAL, M. A.; KOSHI, H.; IKEDA, T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, p. 74–83, 2006.

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

BALDOCCHI, D. D.; HICKS, B. B.; MEYERS, T. P. Measuring biosphere–atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v. 69, n. 5, p. 1331–1340, 1988.

BALDOCHI, 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.

BERGAMASCHI, H.; et al. Intercepted solar radiation by maize crops subjected to different tillage systems and water availability levels. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 12, p. 1331-1341, 2010.

BERRY, J. A.; BJORKMAN, O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 31, p. 491-543, 1980.

BIUDES, M. S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do pantanal pelo método da Razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 135-143, 2009.

BURBA, G. G.; VERMA, S. B.; KIM, J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, p. 31-51, 1999.

CAMPANHA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Levantamento de avaliação da safra 2010/2011**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_04_07_11_02_42_boletim_abril-2011.pdf. Acessado em 21 de abril de 2011.

CAMPBELL, C. S.; HEILMAN, J. L.; MCINES, K. J.; WILSON, L. T.; MEDLEY, J. C.; WU, G.; COBER, D. R. Diel and seasonal variation in CO₂ efflux of irrigated rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, p. 15-27, 2001.

CARNEIRO, J. V. **Fluxos turbulentos de CO₂ em uma área de arroz irrigado no RS**. 2007. 56 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P. A.; DOURADO NETO, D.; LIER, Q. J. V.; MÜLLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e fisiologia na produção da soja. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, v. 14, p. 102-120, 2007.

COLLATZ, G. J.; BALL, J. T.; GRIVET, C.; BERRY, J. A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 54, p. 107–136, 1991.

CUNHA, G.R. *et al.* Balanço de energia em cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1996.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

- DETOMINI, E. R.; MASSIGNAN, L. F. D.; BERNARDES, M. S.; DOURADO NETO, D. Coeficiente de extinção de luz para o Híbrido Dkb 390 em dois níveis de suprimento de nitrogênio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, n. 2, p.155-162, 2008.
- EARL, H. J.; DAVIS, R. F. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. **Agronomy Journal**, v.95, p. 688-696, 2003.
- FANCELLI, A. L. Ecofisiologia de plantas de lavouras. In: Carlesso et al. **Irrigação por Aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS, p.59-73, 2001.
- FANCELLI, A. L. **Fisiologia, nutrição e adubação do milho para alto rendimento**. Piracicaba, São Paulo. Departamento de Produção Vegetal. São Paulo: ESALQ/USP, 2003, 9p.
- FANCELLI, A. L. Plantas alimentícias: guia para aula, estudo e discussão. **Informações Agronômicas POTAFOS**. CALQ: Piracicaba, LPV. 1986. 131p.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.
- FARIAS, S. E. M. et al. Balanço de energia em plantio de milho no cerrado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 2, p. 227-233, 2004.
- FISCHER, K. S.; PALMER, A. F. E. Maize. In: W. H. Smith e S. J. Banta (Editors). **Potential Productivity of Field Crops under Different Environments**. IRRI, Los Baños, Philippines, p. 155-180, 1983.
- FREEDMAN, J. M.; FITZJARRALD, D. R.; MOORE, K. E.; SAKAI, R. K. Boundary layer clouds and vegetation-atmosphere feedbacks, **J. Clim.**, v. 14, p. 180–197, 2001.
- GOULDEN, M. L.; MUNGER, J. W.; FAN, S.; DAUBE, B. C.; WOFSEY, S. C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, v. 2, p. 169-182, 1996.
- GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle. **Journal of Ecology**, v. 92, p. 189-202, 2004.
- GU L.; BALDOCCHI D.; VERMA S. B. et al. (2002) Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. ACL2-1–ACL2-23.

GU, L.; FALGE, E. M.; BODEN, T.; BALDOCCHI, D. D.; BLACK, T. A.; SALESKA, S. R.; SUNI, T.; VERMA, S. B.; VESALA, T.; WOFSY, S. C.; XU, L. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, p. 179-197, 2005.

GU, L.; FUENTES, J. D.; SHUGART, H. H.; STAEBLER, R. M.; BLACK, T. A. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests, **Journal of Geophysical Research**, 104, 31,421–31,434, 1999.

HIRASAWA, T.; HSIAO, T. C. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field. **Field Crops Research**, v. 62, p. 53–62, 1999.

HOLLINGER, D. Y.; KELLIHER, F.M.; BYERS, I.N.; HUNT, J.E.; MCSEVENY, T. M.; WEIR, P. L. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. **Ecology**, v. 75, p. 134-150, 1994.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. **Atmospheric Boundary Layer Flows**. Oxford University Press: New York. 1994. 289 p.

KAR, G.; KUMAR, A. Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. **Irrigation Science**, v. 28, p. 211–220, 2010.

KIMBALL, B. A. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 779-788, 1983.

KINIRY, J. R. Maize phasic development. In: Hanks, R.J., Ritchie, J.T. (Eds.), **Modeling Plant and Soil System**. Agronomy Monograph No. 31, p. 55–70, 1991.

KUNZ, J. H.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. H.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, E. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, nov. 2007.

LACERDA, C. F.; CARVALHO, C. M.; VIEIRA, M. R.; NOBRE, J. G. A.; NEVES, A. L. R.; RODRIGUES, C. F. Análise de crescimento de milho e feijão sob diferentes condições de sombreamento. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n.1, p. 18-24, jan-mar, 2010.

LARCHER, W.; BAUER, H. Ecological significance of resistance to low temperatures. **Physiological Plant Ecology**, Vol. 1, Responses to Physical Environment (eds O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. O. Osmond & H. Zelinger), Springer Verlag, Berlin, p. 408- 439, 1981.

- LAW, B. E.; et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 97–120, 2002.
- LI, S.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 95, p. 1214-1222, 2008.
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. 10 p. EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 76).
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2002. 23 p. EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 22).
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M; PAIVA, E. **Fisiologia da planta de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1995. 27 p. EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 20).
- MARTINS, D. J. **Modificações morfofisiológicas em plantas de milho submetidas a déficit hídrico**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- MASSMAN, W. J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 104, p. 185- 198, 2000.
- MEINKE, H. **Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping perspective**. 1996. 270 f. Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, UK.
- MERCADO, L. M.; BELLOUIN, N.; SITCH, S.; BOUCHER, O.; HUNTINGFORD, C.; WILD, M.; COX, P. M. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. **Nature**, v. 458, 23 de abril 2009, doi:10.1038/nature07949.
- MEYERS, T. P.; HOLLINGER, S. E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 105-115, 2004.
- MONCRIEFF, J. B.; MALHI, Y.; LEUNING, R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. **Global Change Biology**, v. 2, p. 231-240, 1996.
- MONCRIEFF, J. B.; MASSHEDER, J. M.; BRUIN, H.; ELBERS, J.; FRIBORG, T.; HEUSINVELD, B.; KABAT, P.; SCOTT, S.; SOEGAARD, H.; VERHOEF, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, v. 188-189, p. 589-611, 1997.

MONSI, M.; SAEKI, T. Ueber den lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion (The light in plant communities and its significance for dry matter production). **Japanese Journal of Botany**, v. 14, p. 22-52, 1953.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: Fogg, G. E. (Ed.), **The State and Movement of Water in Living Organisms**. Proc. Symp. Soc. Exp. Biol., vol. 19. Academic Press, New York, p. 205–234, 1965.

MONTEITH, J. L. Gas exchange in plant communities. In: Evans, L. T. (Ed.), **Environmental Control of Plant Growth**. Academic Press, New York, p. 95–112, 1963.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. 2^a ed., Edward Arnold. London, 1990. 291 p.

MUCHOW, R. C. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. **Field Crops Research**, v. 23, p.145-158, 1990.

NEVES, L. O. **Fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente na cultura de caupi (*Vigna unguiculata* L.)**. 2006. 43 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NEWTON, P. C. D.; CLARK, H.; BELL, C. C.; GLASGOW, E. M.; TATE, K. R.; ROSS, D. J.; YEATES, G. W.; SAGGAR, S. Plant growth and soil processes in temperate grassland communities at elevated CO₂. **Journal of Biogeography**, v. 22, p. 235-240, 1995.

OGUNTUNDE, P. G. VAN DE GIESEN, N. Crop growth and development effects on surface albedo for maize and cowpea fields in Ghana, West Africa. **International Journal of Biometeorology**, v. 49, p. 106–112, 2004.

OLIVEIRA, P. H. F.; ARTAXO, P.; PIRES, C.; DE LUCCA, S.; PROCOPIO, A.; HOLBEN, B.; SCHAFER, J.; CARDOSO, L. F.; WOFSY, S. C.; ROCHA, H. R. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. **Tellus B.**, v. 59, p. 338-349, 2007.

PATTEY, E.; ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; DUBE, P. A. Estimation of the net CO₂ assimilation rate of a maize (*Zea mays* L.) canopy from leaf chamber measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 55, p. 37-57, 1991.

PRIANTE FILHO, N.; et al. Comparison of the mass and energy Exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, v. 10, p. 863-876, 2004.

ROCHETTE, P.; DESJARDIN, R.L.; PATTEY, E.; LESSARD, R. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop. **Agron. J.**, v. 88, n. 4, p. 627–635, 1996.

- ROMANO, M. R. **Desempenho fisiológico da cultura de milho com plantas de arquitetura contrastante: parâmetros para modelos de crescimento.** 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment.** New York: J. Wiley, 1983. 495 f.
- SAVAGE, M. J.; McINNIS, K. J.; HEILMAN, J. L. Placement height of eddy correlation sensors above a short turfgrass surface. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 74, p. 195-204, 1995.
- SENTELHS, P. C.; MONTEIRO J. E. B. A. Informações para uma Agricultura Sustentável. In.: **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola.** Brasília, DF: INMET, 2009.
- SHAW, R. H. Climatic requirements. In: **Corn and corn improvement.** Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Publisher, p. 591-623 (Serie Agronomy, 18), 1977.
- SILVA, M. A. V. **Interações entre microclima, parâmetros de crescimento da planta, e informações espectrais em cultivo de milho irrigado sob plantio direto.** 2009. 105 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SINCLAIR, T. R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 98-105, 1989.
- SOEGARD, H.; JENSEN, N. O.; BOEGH, E.; HASAGER, C. B.; SCHELDE, K.; THOMSEN, A. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 114, p. 153-173, 2003.
- SOUZA, P. J. O. P.; et al. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 65–73, 2010.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Coupling of carbon dioxide and water vapor exchanges of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems and water productivity. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 553-563, 2010.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 417–427, 2008.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G. Interannual variability in net CO₂ exchange of a native tallgrass prairie. **Global Change Biology**, v. 9, p. 1–11, 2003.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G.; ARKEBAUER, T. J. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 180–190, 2005.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G.; ARKEBAUER, T. J.; WALTERS, D. T.; HUBBARD, K. G. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 1-13, 2004.

TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P.; PRUEGER, J. H.; STARKS, P. J.; WESELY, M. L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 279-300, 2000.

UNITED STATE AGRICULTURE DEPARTMENT: FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE – USDA-FAS. **Table 04 Corn Area, Yield, and Production**. Disponível em: <http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdReport.aspx?hidReportRetrievalName=Table+04+Corn+Area%2c+Yield%2c+and+Production++++&hidReportRetrievalID=884&hidReportRetrievalTemplateID=1>. Acessado em 21 de abril de 2011.

URBAN, O.; et al. Ecophysiological controls over the net ecosystem exchange of mountain spruce stand. Comparison of the response in direct vs. diffuse solar radiation. **Global Change Biology**, v. 13, p. 157–168, 2007.

VERMA, S. B.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; WALTERS, D. T.; KNOPS, J. M.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E.; BURBA, G. G.; AMOS, B.; YANG, H.; GINTING, D.; HUBBARD, K. G.; GITELSON, A.; WATER-SHEA, E. A. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 77–96, 2005.

VIANELO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicada**. Viçosa, Impr. Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449 p.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. S.; NOGUEIRA, J. S.; RAITER, F.; HOEGEL, W.; CAMPELO JR, J. H. Effects of meteorological variations on the CO₂ exchange of a brazilian transitional tropical forest. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. S89-S100, 2004.

WILSON, K. B.; BALDOCCHI, D. D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 100, p. 1–18, 2000.

WILSON, K.; et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 223–243, 2002.