

EVANDRO CHAVES DE OLIVEIRA

**BALANÇO DE CARBONO E ENERGIA PARA UMA LAVOURA DE SOJA:
MÉTODO DA COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS E A
ESTIMATIVA DO MODELO CROPGRO-SOYBEAN**

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

O48b
2011

Oliveira, Evandro Chaves de, 1980-
Balanço de carbono e energia para uma lavoura de soja :
método da covariância dos vórtices turbulentos e a
estimativa do modelo CROPGRO-Soybean / Evandro Chaves
de Oliveira. – Viçosa, MG, 2011.
xiii, 158f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: José Maria Nogueira da Costa.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Meteorologia agrícola. 2. Carbono. 3. Energia. 4. Soja.
5. Tomada de decisão. 6. Radiação solar. 7. Produtividade
agrícola - Simulação por computador. I. Universidade
de Viçosa. II. Título.

Federal

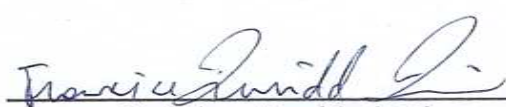
CDD 22. ed. 630.2515

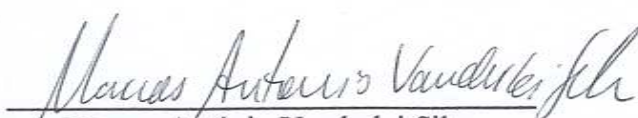
EVANDRO CHAVES DE OLIVEIRA

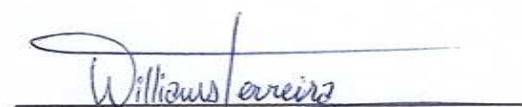
**BALANÇO DE CARBONO E ENERGIA PARA UMA LAVOURA DE SOJA:
MÉTODO DA COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS E A
ESTIMATIVA DO MODELO CROPGRO-SOYBEAN**

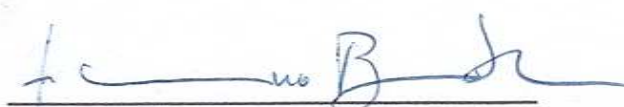
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

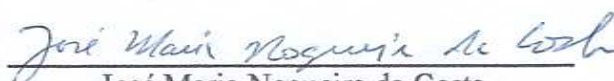
APROVADA: 29 de julho de 2011.


Francisca Zenaide de Lima


Marcos Antônio Vanderlei Silva


Williams Pinto Marques Ferreira
(Coorientador)


Flávio Barbosa Justino
(Coorientador)


José Maria Nogueira da Costa
(Orientador)

A meus pais,
Roberto Ilha de Oliveira e Margarete Chaves de Oliveira,
por serem minha fonte de carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais está vitória, pela força espiritual sempre presente e por ter posto no meu caminho as pessoas abaixo citadas.

Aos meus pais, Roberto Ilha de Oliveira e Margarete Chaves de Oliveira, pela educação, cultura, confiança e juntamente com meu padrinho Volnei Ilha de Oliveira e meus irmãos, Elizandra, Eliane e Leandro, pelos constantes incentivos.

À minha namorada Sabrina Rohdt da Rosa, pelo amor, pelo apoio, pela compreensão e pelo incentivo.

Aos demais familiares, por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões, dando-me forças para jamais desistir de continuar.

Ao professor José Maria Nogueira da Costa, pela orientação, pelos ensinamentos e pela amizade.

À Universidade Federal de Viçosa e à área de Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Programa de Pós-Graduação.

Aos professores Flávio Barbosa Justino, Williams Pinto Marques Ferreira, Marcos Antônio Vanderlei Silva e à pesquisadora Francisca Zenaide de Lima, pelos incentivos e pelas sugestões para melhoria do trabalho.

À Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas, pela disponibilização dos dados experimentais, que foram essenciais no desenvolvimento do trabalho, em especial à professora Débora Regina Roberti.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos demais professores, por terem enriquecido a minha formação acadêmica.

Aos colegas e aos amigos, especialmente os companheiros do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pelo companheirismo e pelo apoio em todas as etapas vividas durante a realização deste estudo.

Aos meus amigos Leonardo Neves, Leonardo Aguiar, Paulo Ciclone, Walter Batista, Graciela Fischer, Rafael Delgado, Rafael Ávila, Marcelo Cid, Maria Emilia, Paulo Jorge, Rose Ane e Douglas Lindemann, pelos momentos de alegria e amizade, sendo essenciais no processo de amadurecimento pessoal e profissional.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pelo apoio e pela amizade, em especial à secretária da pós-graduação, Graça Freitas.

Aos servidores do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Itapina, pelo grande apoio na fase final do meu doutorado.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

EVANDRO CHAVES DE OLIVEIRA, filho de Roberto Ilha de Oliveira e Margarete Chaves de Oliveira, nasceu em 30 de março de 1980, em Cachoeira do Sul, RS.

Em fevereiro de 2005, graduou-se em Meteorologia, pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em Pelotas, RS.

Em fevereiro de 2005, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas, defendendo a dissertação em março de 2007.

Em março de 2007, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa, na área de Modelagem Agrometeorológica.

Em julho de 2010, ingressou no quadro de professor efetivo do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Itapina, em Colatina, ES.

Em julho de 2011, apresentou a defesa de tese com aprovação unânime.

SUMÁRIO

RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1 - BALANÇO DE ENERGIA EM LAVOURA DE SOJA (<i>Glycine max</i> (L) Merrill) EM CRUZ ALTA, RS.....	5
1. INTRODUÇÃO	5
2. MATERIAL E MÉTODOS	7
2.1. Caracterização da área experimental.....	7
2.2. Dados do experimento de campo	8
2.3. Medidas micrometeorológicas	9
2.4. Cálculos dos fluxos turbulentos	11
2.5. Método do balanço de energia	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
3.1. Variáveis meteorológicas	12
3.2. Índice de área foliar (IAF) e altura da soja	14
3.3. Radiação solar global e partição do saldo de radiação sobre cultura.....	15
3.4. Razão de Bowen.....	17
3.5. Evapotranspiração da soja (ETc)	18
4. CONCLUSÃO	20
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
CAPÍTULO 2 - CALIBRAÇÃO DO MODELO CROPGRO-SOYBEAN PARA CONDIÇÕES DE SOLO E CLIMA EM CRUZ ALTA, RS	24

1. INTRODUÇÃO	24
2. MATERIAL E MÉTODOS	26
2.1. Descrição do modelo CROPGRO-Soybean.....	26
2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
3.1. Coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean.....	31
3.2. Avaliação da calibração fenológica	32
3.3. Avaliação do crescimento	32
4. CONCLUSÃO	35
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
CAPÍTULO 3 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SOJA: COMPARAÇÃO ENTRE O	
MÉTODO DA COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS E A	
ESTIMATIVA DO MODELO CROPGRO-SOYBEAN	
1. INTRODUÇÃO	37
2. MATERIAL E MÉTODOS	39
2.1. Descrição da área de estudo e do modelo CROPGRO-Soybean	39
2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean	40
2.3. Balanço de água no solo.....	44
2.4. Medidas micrometeorológicas	45
2.5. Cálculos dos fluxos turbulentos	45
2.6. Eficiência do uso de água (EUA) na cultura da soja.....	46
2.7. Análise estatística.....	46
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
3.1. Condições hídricas	48
3.2. Biomassa seca e índice de área foliar.....	49
3.3. Umidade do solo	50
3.4. Evapotranspiração da soja.....	53
3.5. Eficiência no uso da água.....	57
4. CONCLUSÃO	59
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
CAPÍTULO 4 - ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DE USO DA RADIAÇÃO	
FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA PELO MODELO CROPGRO-SOYBEAN.....	
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAL E MÉTODOS	66
2.1. Descrição da área de estudo e do modelo CROPGRO-Soybean	66
2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean	67

2.3. Eficiência no uso da radiação.....	70
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
3.1. Condições meteorológicas durante o experimento	71
3.2. Radiação global e radiação fotossinteticamente ativa.....	72
3.3. Radiação fotossinteticamente ativa interceptada	75
3.4. Biomassa seca e índice de área foliar.....	77
3.5. Eficiência no uso da radiação.....	78
4. CONCLUSÃO	80
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
CAPÍTULO 5 - BALANÇO DE CARBONO PARA UMA LAVOURA DE SOJA NO RS: FLUXO TURBULENTO DE CO ₂ E A ESTIMATIVA DO MODELO CROPGRO- SOYBEAN.....	84
1. INTRODUÇÃO	84
2. MATERIAL E MÉTODOS	87
2.1. Caracterização da área experimental.....	87
2.2. Descrição do modelo CROPGRO-Soybean.....	88
2.3. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean	89
2.4. Balanço de carbono	92
2.5. Medidas micrometeorológicas	93
2.6. Cálculos dos fluxos turbulentos	94
2.7. Eficiência do uso da água (EUA) na cultura da soja.....	95
2.8. Eficiência do uso da radiação (EUR) na cultura da soja.....	95
2.9. Análise estatística.....	95
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
3.1. Condições meteorológicas	98
3.2. Índice de área foliar.....	99
3.3. Concentração de dióxido de carbono (CO ₂).....	100
3.4. Assimilação de carbono (Fc) no agroecossistema soja	100
3.5. Eddy vs CROPGRO	102
3.6. Eficiência do uso da água (EUA) na soja.....	109
3.7. Eficiência do uso da radiação (EUR).....	110
4. CONCLUSÃO	112
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
CAPÍTULO 6 - CULTIVO DA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL: PERSPECTIVA ATUAL E FUTURA	117

1. INTRODUÇÃO	118
2. MATERIAL E MÉTODOS	120
2.1. Descrição do modelo.....	120
2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean	120
2.3. Coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean.....	122
2.4. Avaliação da calibração fenológica	123
2.5. Avaliação do crescimento	124
2.6. Técnicas culturais utilizadas nas simulações de longo período	125
2.7. Cenários de mudança climática.....	126
2.8. Aplicação do modelo em cenários de mudança climática	126
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	128
3.1. Influência da mudança no clima agrícola regional na cultura de soja	128
3.3. Influência a mudança climática no rendimento da cultura de soja	132
3.5. Influência da mudança climática na eficiência do uso de água na cultura de soja	137
4. CONCLUSÕES	137
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
RESUMO E CONCLUSÃO GERAL.....	143
REFERÊNCIAS.....	146

RESUMO

OLIVEIRA, Evandro Chaves de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Balanço de carbono e energia para uma lavoura de soja: método da covariância dos vórtices turbulentos e a estimativa do modelo CROPGRO-Soybean.** Orientador: José Maria Nogueira da Costa. Coorientadores: Flávio Barbosa Justino e Williams Pinto Marques Ferreira.

O presente trabalho objetivou analisar o balanço de energia e a partição do saldo de radiação em suas componentes de fluxo de calor latente, de calor sensível e de calor no solo durante o ciclo da cultura da soja na região de Cruz Alta, Estado do Rio Grande do Sul; calibrar o modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento, CROPGRO-Soybean (Crop-Environment Resource Synthesis), para a cultivar de soja FUNDACEP 53RR, cultivada na mencionada região; avaliar a estimativa da evapotranspiração da cultura da soja gerada pelo modelo CROPGRO-Soybean em relação aos dados de fluxos de calor latente medidos em condições de campo pelo método da covariância dos vórtices turbulentos; testar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean em simular a eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa em diferentes fases fenológicas de uma cultivar de soja cultivada na região de Cruz Alta, RS; avaliar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean integrado do sistema DSSAT no balanço de carbono da cultura da soja com os dados experimentais de medição de fluxo de CO₂ pelo método da covariância dos vórtices turbulentos; analisar os possíveis impactos da mudança climática na cultura da soja no Rio Grande do Sul, baseado no modelo CROPGRO-

Soybean, num cenário de mudança climática, que inclui o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2). Para tanto, foram utilizados dados de experimento de campo usando técnica de covariância dos vórtices turbulentos conduzidos na Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) em Cruz Alta, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil ($28^{\circ}36'S$, $53^{\circ}40'W$ e altitude 409 m), no ano agrícola de 2009/2010. Para a análise dos impactos das alterações climáticas, foram utilizados dados de simulações climáticas regionais (HadRM3), para o cenário climático de controle (1960 a 1990), e os cenários climáticos futuros B2 e A2 (2071 a 2100) no modelo CROPGRO-Soybean. Os resultados obtidos neste estudo indicaram que o método da covariância dos vórtices turbulentos foi capaz de reproduzir de maneira satisfatória os fluxos de energia acima da cultura de soja durante todo o período experimental. Por meio das análises realizadas nas simulações, foi identificado que o modelo CROPGRO-Soybean apresentou resultados satisfatórios na simulação da ocorrência de estádios fenológicos da cultura e também sobre o rendimento de grãos, mas demonstrou limitações nas estimativas de biomassa e índice de área foliar da cultivar de soja avaliada para as condições de solo e clima de Cruz Alta, RS. O modelo superestimou a evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura, provavelmente, por não representar de forma realística os resíduos culturais, indicando necessidade de ajustes em parâmetros do balanço de água no solo em sistema de plantio direto. O modelo CROPGRO-Soybean apresentou boa capacidade de predição da radiação fotossinteticamente ativa incidente, para as condições, características do período e fatores considerados. O modelo não simula o transporte de carbono na atmosfera, apenas a produção de carbono devido ao balanço de carbono. Por essa razão, apesar do modelo reproduzir o comportamento geral do fluxo de carbono, algumas variações em escala diária não conseguem ser reproduzidas. Quanto aos impactos das alterações climáticas, os resultados indicam que, o acréscimo de rendimento de grãos estimado resultou, essencialmente, das projeções da concentração de CO_2 e de temperatura para os cenários futuros, ou seja, os efeitos positivos derivados do aumento da concentração de CO_2 (fertilização de CO_2) constituiu, provavelmente, a principal causa do aumento do rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Evandro Chaves de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Carbon and energy balance for a soybean crop: method Eddy Covariance and the estimation of CROPGRO-Soybean model.** Adviser: José Maria Nogueira da Costa. Co-advisers: Flávio Barbosa Justino and Williams Pinto Marques Ferreira.

The objectives of the present work were: 1) to analyze the energy balance and the partition of net radiation into its components of latent heat, sensible heat and soil heat fluxes during the cycle of the soybean crop in the region of Cruz Alta, State of Rio Grande do Sul, 2) to calibrate the simulation model of growth and development, CROPGRO-Soybean (Crop-Environment Resource Synthesis), for soybean cultivar FUNDACEP 53RR, grown in that region, 3) to assess the estimated evapotranspiration of soybeans generated by CROPGRO-Soybean with the data of latent heat flux measured under field conditions by the method of eddy covariance, 4) to test the performance of the CROPGRO-Soybean model to simulate the photosynthetically active radiation use efficiency at different phenological stages of a soybean cultivar grown in the region of Cruz Alta, RS, 5) to evaluate the performance of the CROPGRO-Soybean DSSAT system integrated in the carbon balance of soybean with the experimental data for flow measurement CO₂ by the method of eddy covariance, 6) to analyze the potential impacts of climate change on soybean crop in Rio Grande do Sul, based on CROPGRO-Soybean, a climate change scenario, which includes increasing the concentration of carbon dioxide (CO₂). To this end, we used data from field experiments using the technique of eddy covariance conducted in Sulflux Network

(Network South Brazilian Surface Flows and Climate Change) in Cruz Alta, Rio Grande do Sul - Brazil (28°36'S, 53°40'W and altitude 409 m) in the 2009/2010 crop year. To analyze the impacts of climate change, we used data from regional climate simulations (HadRM3) to control the climate scenario (1960-1990) and future climate scenarios A2 and B2 (2071-2100) in the CROPGRO- Soybean. The results of this study indicate that the method of eddy covariance was able to reproduce satisfactorily the energy flows above the soybean throughout the experimental period. Through the analysis performed in the simulations, it was found that the CROPGRO-Soybean simulation showed satisfactory results in the occurrence of phenological stages of culture and also on the grain yield, but showed limitations in the estimates of biomass and leaf area index of cultivar Soy evaluated for the conditions of soil and climate of Cruz Alta - RS. The model overestimated evapotranspiration during the crop cycle, probably not realistically represent the residues, indicating a need for adjustments in the parameters of the water balance in soil-tillage. The CROPGRO-Soybean showed good predictive ability of photosynthetically active radiation incident to the conditions, period features and factors considered. The model does not simulate the transport of carbon in the atmosphere, only the production of carbon due to the carbon balance. Therefore, although the model reproduce the general behavior of the flow of carbon, some variations in the daily scale cannot be reproduced. Regarding the impacts of climate change, the results indicate that the increase in grain yield estimate resulted primarily from the projections of CO₂ concentration and temperature scenarios for the future, ie, the positive effects resulting from higher concentration of CO₂ (CO₂ fertilization) was probably the main cause of increased soybean yield in Rio Grande do Sul.

INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine Max (L.) Merrill*) foi a cultura escolhida para o presente estudo por destacar-se entre as mais importantes no contexto da agricultura mundial. A produção mundial de soja para a safra de 2009/2010, foi de 259,7 milhões de toneladas, com área plantada de 102,0 milhões de hectares (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA, 2011). O Brasil é o segundo maior produtor de soja, após os EUA, ressaltando a importância desta cultura para o país. Na safra 2009/2010, a cultura ocupou uma área de 23,6 milhões de hectares, o que totalizou uma produção de 68,7 milhões de toneladas. A produtividade média da soja brasileira foi de 2.941 kg por hectares (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2011).

No estado do Rio Grande do Sul foram colhidas em torno de 9,5 milhões de toneladas de soja em uma área plantada de aproximadamente 3,8 milhões de hectares, posicionando-o como o terceiro maior produtor brasileiro de soja na safra 2009/2010, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011).

Embora o Estado se destaque como um importante referencial na produção de soja no Brasil, poderá ter sua produtividade melhorada a partir da maior adoção de tecnologias e estudos que possam diminuir os riscos de quebra de rendimento, principalmente as mudanças climáticas sugeridas por diversos setores da comunidade científica.

Todavia, o aumento na produção agrícola no estado do Rio Grande do Sul deverá contribuir para o aumento das emissões dos gases participantes no fenômeno do

efeito estufa, que tem se destacado como um dos principais problemas ambientais atuais. O dióxido de carbono (CO_2) é considerado o mais importante gás do efeito estufa de origem antropogênica, cuja concentração aumentou de 280 ppm, no período pré-industrial, para 379 ppm em 2005, e a tendência é atingir entre 730 a 1020 ppm até 2100 (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2007). Aliado a este fato, a temperatura média global no período de 1906 a 2005 subiu $0,74^\circ\text{C}$, e estima-se que em 2100 deva se elevar de 2 a $4,5^\circ\text{C}$, conforme as previsões do último relatório do IPCC (2007). Se os cenários de mudança climática previstos realmente se confirmarem no futuro, um dos setores mais afetados será a agricultura, já que as plantas são diretamente influenciadas pela temperatura do ar e concentração de CO_2 na atmosfera (TAIZ; ZEIGER, 2004).

As plantas com metabolismo C_3 , como a soja, são mais beneficiadas pelo aumento da concentração de CO_2 atmosférico do que aquelas com metabolismo C_4 (SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). No entanto, se o aumento da concentração de CO_2 for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas devido ao encurtamento do ciclo (SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração de manutenção (TAIZ; ZEIGER, 2004).

O aumento na concentração de CO_2 aponta para alterações na produtividade das lavouras. Segundo Lima (2005), em condições experimentais controladas, o aumento na concentração de CO_2 resultou em aumento entre 20% a 30% nas taxas de fotossíntese. Em relação à cultura da soja e os efeitos do dióxido de carbono atmosférico, Heinemann et al. (2006) conduziram experimentos em ambiente controlado e enriquecido com concentrações na faixa de 400 e 700 ppm e em diferentes níveis de temperaturas diurnas e noturnas respectivamente ($20/15$, $25/20$ e $30/25^\circ\text{C}$). Os resultados apontaram aumento na biomassa total das plantas e no peso dos grãos quando o ambiente atingiu o nível de 700 ppm em condições de temperaturas amenas. No entanto, estudos dessa natureza são difíceis de serem executados, pois, o aparato experimental é oneroso e de manuseio complexo (ANDRESEN et al., 2001).

Diante de todos os aspectos e dificuldades operacionais dos experimentos em campo, os modelos de simulação de cultura surgem como ferramenta útil para criar cenários, avaliar impactos e definir medidas de adaptação para o setor agrícola mediante as expectativas das alterações do clima (HEINEMANN et al., 2008; TAO et al., 2008).

Os modelos do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), têm sido usados nos últimos anos por pesquisadores de diferentes países do mundo, na avaliação das respostas da produtividade de várias culturas às mudanças futuras na concentração de CO₂ e temperatura do ar (TUBIELLO et al., 2007; BRASSARD; SINGH, 2008; PATHAK; WASSMANN, 2009).

Entretanto, antes da aplicação dos modelos do sistema DSSAT em avaliações futuras do efeito das atuais mudanças climáticas, deve ser testada sua habilidade para simular os efeitos da concentração de CO₂ nos ecossistemas agrícolas. Alguns estudos em ambientes controlados foram realizados para testar a performance das simulações desses modelos (BOOTE et al., 2002; ALAGARSWAMY et al., 2006).

Com o desenvolvimento da instrumentação do método da covariância dos vórtices turbulentos, informações sobre os fluxos de massa e energia em diversos ecossistemas, estão mais disponíveis para comparações entre as medidas feitas em campo e os resultados de simulações dos diferentes modelos existentes (BALDOCCHI, 2003). Desse modo, surgiram alguns questionamentos tais como: Os padrões de resposta podem ser reproduzidos pelo sistema de suporte a decisão, DSSAT? Como a soja responde aos fluxos turbulentos de energia e CO₂ durante os diferentes estágios da cultura?

As respostas a esses questionamentos estão diretamente ligada ao estudo das trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, com especial ênfase no gás carbônico. Portanto, há necessidade da obtenção de medidas do fluxo de CO₂ na planta em seu ambiente natural para avaliação e performance dos modelos de simulação. Além disso, a cultura da soja tem passado, ao longo de sua história, por um grande processo de melhoramento genético, com o desenvolvimento de novas cultivares sempre adaptadas aos novos sistemas de cultivo. Assim sendo, é importante conhecer como a cultura interage com o meio ambiente e como se dará sua interação caso venham a ocorrer as mudanças climáticas sugeridas por diversos setores da comunidade científica. Essas interações precisam ser melhor compreendidos para que possam ser implementadas no modelo que, depois, será expandido para maiores áreas.

Diante do exposto, com o presente trabalho, considerou-se atingir os objetivo a seguir, estruturado em seis capítulos:

- Analisar o balanço de energia e a partição do saldo de radiação em seus componentes de fluxo de calor latente, de calor sensível e de calor no solo durante o ciclo da cultura da soja na região de Cruz Alta, Estado do Rio Grande do Sul.

- Calibrar o modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento, CROPGRO-Soybean (Crop-Environment Resource Synthesis), para a cultivar de soja FUNDACEP 53RR, cultivada em condições de solo e clima de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul.
- Avaliar a estimativa da evapotranspiração da cultura da soja gerada pelo modelo CROPGRO-Soybean em relação aos dados de fluxos de calor latente medidos em condições de campo pelo método da covariância dos vórtices turbulentos, no Rio Grande do Sul.
- Testar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean em simular a eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa em diferentes fases fenológicas de uma cultivar de soja cultivada na região de Cruz Alta, RS.
- Avaliar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean integrado do sistema DSSAT no balanço de carbono da cultura da soja com os dados experimentais de medição de fluxo de CO₂ pelo método da covariância dos vórtices turbulentos, no Rio Grande do Sul.
- Analisar os possíveis impactos da mudança climática na cultura da soja no Rio Grande do Sul, baseado no modelo CROPGRO-Soybean, num cenário de mudança climática, que inclui o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂).

CAPÍTULO 1

BALANÇO DE ENERGIA EM LAVOURA DE SOJA (*Glycine max* (L) Merrill) EM CRUZ ALTA, RS

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo determinar os componentes do balanço de energia (saldo de radiação, fluxo de calor latente, de calor sensível e de calor no solo), e a evapotranspiração da soja cultivada sob condições de sequeiro. O estudo foi desenvolvido na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigô (FUNDACEP), localizada no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul (28°36'S, 53°40'W e altitude 409 m), durante o período de 14/12/2009 a 28/04/2010. Para a determinação dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração foi adotado o Método da Covariância dos Vórtices turbulentos. Dentre os resultados obtidos, o valor médio do saldo de radiação (R_n) foi de 57% da radiação solar global, sendo a R_n utilizada, em média, como 56% no fluxo de calor latente (LE), 29% como fluxo de calor sensível (H) e 14% como fluxo de calor no solo (G). Em relação a evapotranspiração, observou-se que o valor total durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura foi de 423,6 mm, com pico máximo de 6,58 mm.dia⁻¹.

Palavras-chave: Saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo, razão de bowen.

1. INTRODUÇÃO

O método do balanço de energia nas superfícies vegetadas tem sido bastante empregado por vários pesquisadores ao redor do mundo (TODD et al., 2000; CUNHA et al., 2002; LIMA et al., 2004; YOSHIMOTO et al., 2005). Ele permite dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, através do estudo da

partição do saldo de radiação (R_n) nos processos que ocorrem na cultura. Além disso, permite avaliar as alterações no microclima da vegetação em função das fases de desenvolvimento da cultura, das condições de solo e da atmosfera. O método do balanço de energia se fundamenta no princípio da conservação de energia. Em sistemas cultivados alguns componentes podem ser desprezados, resultando na equação geral composta pelo saldo de radiação (R_n), pelos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), na atmosfera, e pelo fluxo de calor no solo (G), em que $R_n = LE + H + G$.

O método da covariância dos vórtices turbulentos constitui uma importante ferramenta na quantificação das magnitudes dos fluxos de massa e energia, sendo reconhecido atualmente como a forma mais direta e confiável para o monitoramento de longo prazo dos fluxos em ecossistemas agrícolas (BALDOCCHI, 2003). Esse método vem sendo utilizado pelos pesquisadores para medir os fluxos de calor sensível, vapor d'água e de CO_2 acima das culturas agrícolas, em vários sítios experimentais, tais como: cana-de-açúcar cultivada sob condições de sequeiro (CABRAL et al., 2003); feijão caupi (SAN JOSE et al., 2003; NEVES et al., 2008) e arroz irrigado (CARNEIRO, 2007).

Outro método que vem sendo utilizado com sucesso na quantificação do balanço de energia por diversos pesquisadores nas mais variadas culturas é o método da razão de Bowen (FONTANA et al., 1991; FERNANDES, 2007; RIGHI et al., 2007; NEVES et al., 2008; SILVA et al., 2010). Fontana et al. (1991) utilizaram esse método com soja irrigada e não irrigada, e verificaram que o fluxo de calor latente representou a maior porção do saldo de radiação, sendo 95% na parcela irrigada e 78% na parcela não irrigada. Fernandes (2007) estudou as variações dos fluxos de calor sensível e latente sobre uma cultura de soja irrigada, utilizando o método do balanço de energia expresso pela razão de Bowen, e constatou que em condições de bom suprimento de água e com a cultura cobrindo totalmente o solo a maior porção do saldo de radiação foi usada como fluxo de calor latente.

No entanto, poucos artigos científicos relatam a utilização de métodos micrometeorológicos em estudos dos componentes do balanço de energia na cultura da soja, no Brasil. Neste sentido, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de analisar o balanço de energia e a partição do saldo de radiação em seus componentes de fluxo de calor latente, de calor sensível e de calor no solo, assim como a evapotranspiração durante o ciclo da cultura da soja no Rio Grande do Sul.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigô (FUNDACEP), que está localizada no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, a 28°36' Sul, e 53°40' Oeste e altitude média de 409 metros (Figura 1).

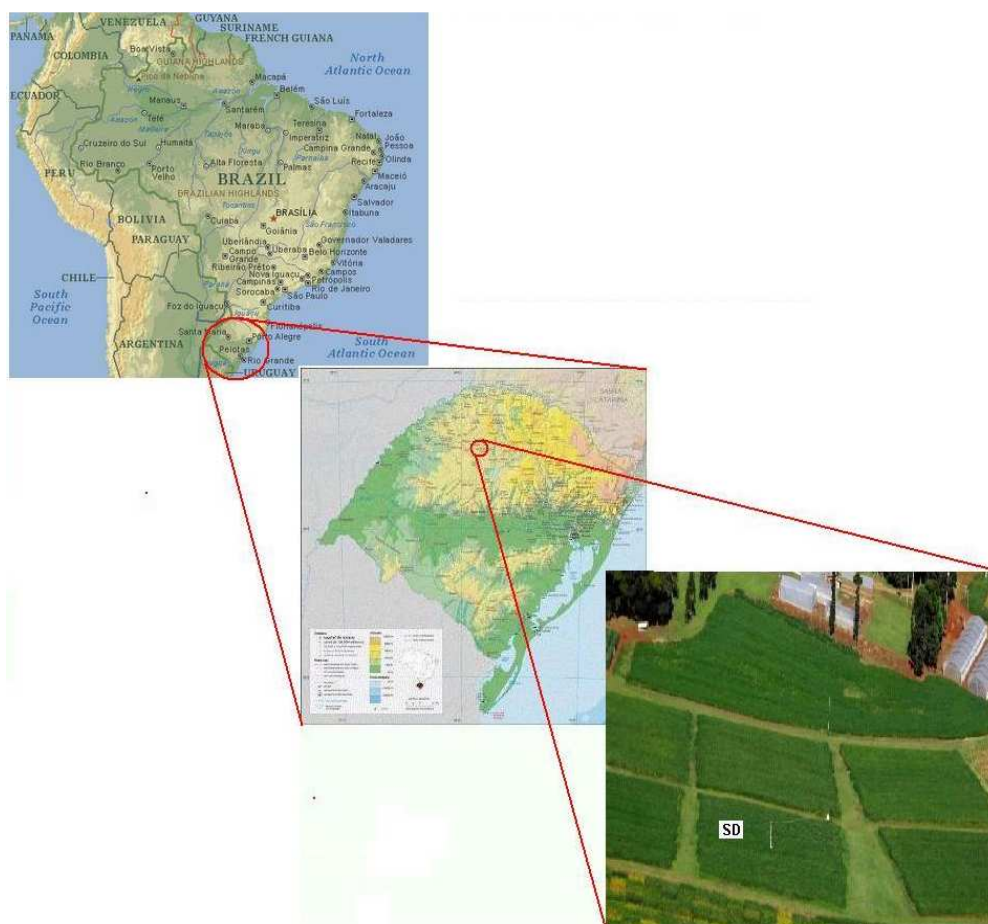


Figura 1 - Localização geográfica e vista aérea do sítio experimental com destaque para as parcelas de sistema de plantio direto (SD) em Cruz Alta, RS.

O clima do local de estudo é considerado subtropical úmido, tipo Cfa, segundo a classificação climática de Köppen, com temperaturas variando entre 8,6 e 30°C, com temperatura média do ar de 18,7°C e precipitação pluviométrica de 1.774 mm por ano, (dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP - 1974 a 2003).

2.2. Dados do experimento de campo

Utilizou-se a cultivar de soja de ciclo precoce, FUNDACEP 53RR, semeada em 14/12/2009, com espaçamento de 0,40 m entre linhas e, população de 300 mil plantas ha⁻¹, em sistema de plantio direto.

Os dados de solo correspondem a características físico-hídricas do tipo de solo encontrado no local de estudo, sendo este o Latossolo Vermelho Distrófico Típico - LVd3 (EMBRAPA, 2006). Na Tabela 1 está apresentada a análise química e física do solo encontrados no campo experimental.

Tabela 1 - Análise química e física do solo encontrados no experimento de campo

Profundidade (cm)	DG (g.cm ⁻³)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)	Fração do solo (%)		
				Areia	Silte	Argila
5	2.50	0.35	0.17	28.57	39.46	31.95
12	2.48	0.34	0.17	27.50	41.34	31.15
60	2.46	0.37	0.22	24.69	46.79	28.505

DG = densidade global; CC = capacidade de campo e PMP = ponto de murcha permanente.

A correção do solo e a adubação da área foram feitas de acordo com os resultados de análise do solo, em concordância com as recomendações de Rolas (1998) para a cultura da soja, utilizando-se 350 kg da formulação NPK de 0-20-20 por hectare na semeadura. O cultivo antecedente foi de aveia. A área foi dessecada com a aplicação do herbicida glifosato. Foi realizado o controle das plantas invasoras remanescentes, quando necessário, com a aplicação do mesmo herbicida. O controle de doenças e

pragas foi realizado de acordo com as práticas culturais recomendadas para o cultivo da soja, garantindo a mínima interferência desses fatores no experimento.

Foram registradas as datas dos estágios e respectivas fases fenológicas da soja, durante os meses de dezembro de 2009 a abril de 2010 (Tabela 2). Para cada data foi determinada a altura. O índice de área foliar (IAF; $\text{cm}^2 \text{folha.cm}^{-2} \text{solo}$) foi calculado em função de amostras de folhas obtidas em 1 m e determinadas no medidor de área foliar. Na maturação fisiológica, foi determinada a massa de 100 sementes (g), produtividade (kg.ha^{-1}).

Tabela 2 - Datas dos estágios e respectivas fases fenológicas da soja na safra 2009/10

Fenologia	Período	Duração (dias)
S-V2	14/12 a 29/12/09	15
V2-V13	30/12 a 07/02/10	38
R1-R2	08/02 a 18/02/10	10
R3-R4	19/02 a 04/03/10	13
R5-R6	05/03 a 12/04/10	37
Maturação	13/04 a 28/04/10	15

Emergência da soja a primeira folha completamente expandida (S-V2); primeira folha completamente expandida ao final do período vegetativo (V2-V13); florescimento (R1-R2); formação da vargem (R3-R4); enchimento de grão (R5-R6); maturação fisiológica a colheita.

2.3. Medidas micrometeorológicas

As medidas micrometeorológicas utilizadas no presente trabalho foram obtidas a partir da Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas), correspondente ao período de novembro de 2009 a abril de 2010. Os fluxos foram medidos por meio do método da covariância dos vórtices turbulentos (BALDOCCHI et al., 1988), sistema de *Eddy Covariance* do tipo “*open path*”, composto de um analisador de gás infravermelho (IRGA) (LI-7500, Licor, Inc., Lincoln, NE) acoplado a um anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), usado para medir as flutuações dos componentes da

velocidade do vento (Figura 1). Os sinais digitais desses instrumentos foram obtidos na frequência de 10 Hz e, as médias obtidas em intervalos de 30 minutos usando o *datalogger* CR23X da Campbell Scientific, onde os dados foram armazenados para o posterior processamento. As informações foram complementadas com medições da temperatura do ar (°C), direção do vento (°), velocidade do vento (m.s^{-1}), umidade relativa (%), radiação solar global (W.m^{-2}), saldo de radiação (W.m^{-2}), precipitação pluvial (mm), radiação PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e temperatura do solo (°C) (Tabela 3), as quais foram coletados durante o período experimental a partir de uma estação meteorológica automática (EMA) instalada numa torre micrometeorológica de três metros de altura, acima da cultura da soja (Figura 2).

Tabela 3 - Instrumentos utilizados nas medições das variáveis meteorológicas coletadas na Estação Meteorológica Automática (EMA)

Variável medida	Instrumento/Modelo	Altura
Temperatura do ar (°C)	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Direção do vento (°)	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Velocidade do vento (m.s^{-1})	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Umidade relativa (%)	<i>Probe HMP45C</i>	2 m
Radiação solar global (W.m^{-2})	Kipp&Zonen- CMP6	2 m
Saldo de radiação (W.m^{-2})	Kipp&Zonen NR LITE	2 m
Precipitação pluvial (mm)	Texas Instruments, INC	1,5 m
Radiação PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	PAR LIT Kipp&Zonen	2 m
Temperatura do solo (°C)	Termopar Tipo E – TCAV-L Campbell Scientific	5 cm*

* Profundidade.



Figura 2 - Sistema *Eddy Covariance* e estação meteorológica automática (EMA) instalados acima da cultura da soja em torre micrometeorológica.

2.4. Cálculos dos fluxos turbulentos

O método de covariância de vórtices (*Eddy Covariance*) foi utilizado para medir o fluxo de CO₂, resultante da interação entre atmosfera e o campo agrícola de soja, assim como os fluxos de calor latente e sensível. Esse método permite determinar o fluxo convectivo de CO₂ (fotossíntese-respiração), da temperatura do ar (fluxo de calor sensível) e da umidade do ar (fluxo de calor latente). De acordo com os trabalhos de Neves (2006) e Carneiro (2007), os fluxos turbulentos de CO₂ (Fc), calor sensível (H) e calor latente (LE) podem ser expressos, respectivamente, da seguinte forma:

$$F_c = \rho \overline{w'c'} + (\text{termos de correção webb})$$

$$H = \rho C_p \overline{w'T'}$$

$$LE = \rho L_v \overline{w'q'}$$

em que ρ é a densidade absoluta do ar; C' , a concentração de CO₂; C_p , o calor específico do ar à pressão constante; w' , o componente vertical das flutuações da velocidade do vento; T' , o desvio instantâneo a partir da média da temperatura do ar; q' , o desvio instantâneo a partir da média da umidade específica; e L_v , o calor latente de vaporização da água.

A barra representa a média do produto em um intervalo de amostragem.

2.5. Método do balanço de energia

O método do balanço de energia usado para quantificar os fluxos entre a cultura da soja e a atmosfera, é descrito pela equação 1:

$$Rn = LE + H + G \quad (1)$$

em que Rn é o saldo de radiação (MJ.m^{-2}), H e LE (MJ.m^{-2}), e G (MJ.m^{-2}).

A partição da energia disponível em termos dos fluxos de calor sensível e calor latente pode ser expressa pela Razão de Bowen (β), de acordo com a equação 2:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2)$$

O valor da Razão de Bowen (adimensional) depende essencialmente das condições hídricas da superfície evaporante. Para superfícies úmidas, o valor resultante da Razão de Bowen deve ser pequeno, já que a maior parte do saldo de radiação (Rn) é utilizada para evaporar a água superficial, sendo portanto, utilizado na forma de calor latente. Para superfícies secas, o valor resultante da Razão de Bowen é grande, já que neste caso, a maior parte de saldo de radiação é utilizada para o aquecimento do ar (PEREIRA et al., 1997).

A taxa de evapotranspiração da cultura foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente pelo calor latente de vaporização, considerado como constante ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variáveis meteorológicas

A Figura 3 ilustra a variação da temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar global e da precipitação pluvial ao longo de todos os estádios da cultura no período experimental. As condições de tempo para a safra agrícola 2009/2010 foram favoráveis para o desenvolvimento da cultura da soja, com precipitações pluviais

frequentes e temperaturas do ar apropriadas que permitiram obter um rendimento de grãos elevado (aproximadamente 48 sacas.ha⁻¹). A precipitação pluvial durante o ciclo da soja foi de 650 mm. Para o Rio Grande do Sul, Berlato et al., (1986) encontraram valor médio de consumo de água para todo ciclo da cultura da soja de 827 mm. Segundo Matzenauer et al. (2003), o período entre R1 e R5 é considerado crítico para a soja quanto à oferta hídrica. Cabe ressaltar que durante o período vegetativo da cultura choveu em torno de 316 mm. Entretanto, de R3 a R5 foram computados 28 mm, sendo que a maior contribuição hídrica na área experimental foi de 21,0 mm, em 23/03/2010, e os demais milímetros restantes (7 mm) ocorreram na forma de chuvas esparsas com baixo volume pluvial.

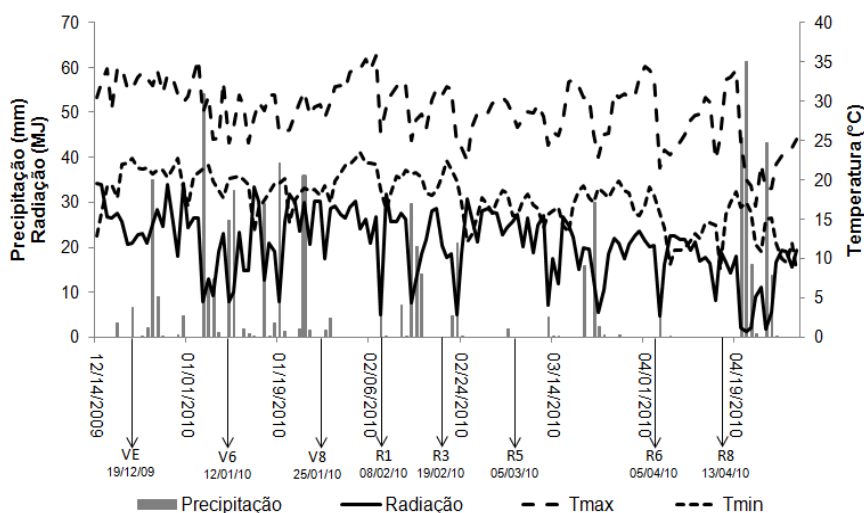


Figura 3 - Dados meteorológicos observados durante o ciclo da cultivar FUNDACEP 53RR para o ano de 2009/2010.

O total acumulado de radiação solar global (Rg), no período compreendido entre a semeadura e a maturação fisiológica da cultura da soja foi de 2498 MJ.m⁻², sendo a média de 21,5 MJ.m⁻².dia⁻¹ e os valores extremos de 34,1 e 4,5 MJ.m⁻².dia⁻¹. A temperatura do ar apresentou tendência de decréscimo até o final do ciclo da cultura. De acordo com Santos (1999), a variação diurna da temperatura do ar segue o mesmo padrão do ciclo radiativo, durante o dia é alta devido à incidência de da radiação solar, enquanto que no período noturno é menor, devido ao resfriamento radiativo. No ciclo da

cultura, a temperatura média foi de 23,4°C, com médias das temperaturas extremas de 17,8°C a 28,9°C, para as mínimas e máximas, respectivamente. As temperaturas máximas ficaram abaixo de 35°C e as mínimas foram predominantemente superiores a 10°C, ou seja, a cultura se manteve na faixa dos limites térmicos favoráveis durante o seu ciclo. Os dados corroboram com as afirmações de Berlato (1992) e Barni (1999) que o regime térmico não apresenta limitações à soja no Rio Grande do Sul.

3.2. Índice de área foliar (IAF) e altura da soja

Na Figura 4 estão representados os valores do índice de área foliar, estimado experimentalmente durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja em períodos quinzenais. O máximo IAF foi de 6,1 m².m⁻² no início da formação de legumes (R3). Na Figura 3 são apresentadas, também, as alturas das plantas no início de cada fase do ciclo da soja. Foi observado, no final do experimento, que a cultura da soja atingiu a altura de 107,75 cm, sendo que a maior variação no crescimento ocorreu na fase de desenvolvimento vegetativo (V2-V13) equivalente a 32,45 cm, enquanto que na fase de enchimento de grãos (R5.1 a R5.3) apresentou 4,75 cm menor variação da altura das plantas.

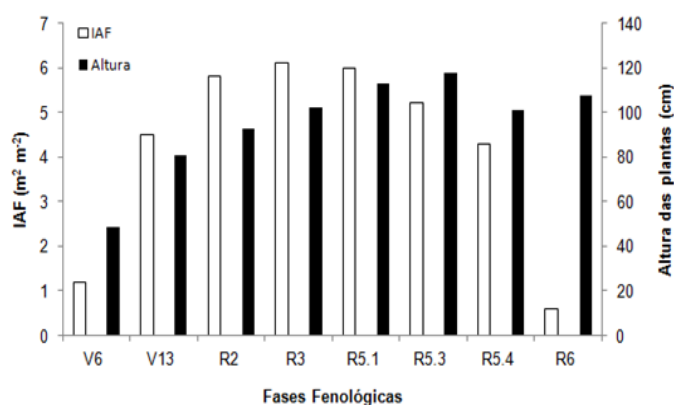


Figura 4 - Valores do índice de área foliar e altura obtida em campo durante o ciclo da soja.

3.3. Radiação solar global e partição do saldo de radiação sobre cultura

O comportamento da variação diária da razão entre o saldo de radiação e a radiação solar global (R_n/R_g) e das razões entre os fluxos de calor latente, sensível e no solo, e o saldo de radiação (LE/R_n , H/R_n e G/R_n , respectivamente) estão apresentadas na Figura 5.

Observa-se que a fração de radiação solar global transformada em energia disponível ao sistema, ou seja, saldo de radiação apresenta uma distribuição regular, apresentando uma tendência de decréscimo a partir da fase de desenvolvimento, em início de abril (R6), até o final da maturação fisiológica, em 28/04/2010 (colheita). O valor médio para todo o ciclo foi de 0,57, alcançando um valor máximo de 0,67 em V6, sendo que os menores valores observados (0,42 a 0,44) se concentram entre a maturação fisiológica e a colheita de grãos. Resultados obtidos por Neves (2011), em pesquisa realizada com a cultura da soja na safra de 2008/09, em Cruz Alta (28°36' S; 53°40' W), apresentaram valores médios dessa razão de 0,59.

Na Tabela 4 e na Figura 5 são apresentados, também, os balanços médio e diário de energia sobre a cultura, respectivamente. Nelas é possível observar que o saldo de radiação foi maior no início do ciclo da cultura (semeadura da soja a primeira folha completamente expandida; S-V2), com valor total médio de aproximadamente 14,9 MJ.m⁻², dos quais 38,5% corresponderam ao fluxo de calor sensível (H), 36,7% ao fluxo de calor latente (LE) e 17,2% ao fluxo de calor no solo (G). Dos componentes do balanço de energia analisados nesta pesquisa, o fluxo de calor latente (LE) representou maiores porcentagens do saldo total de radiação na fase V2 a R6 do ciclo da soja, sendo que sua maior representatividade ocorreu na R3-R4 (78,9%) e a menor na fase R5-R6 (55,4%). Na fase de maturação fisiológica o fluxo de calor sensível (H) representou 68,7% do saldo de radiação (5,3 MJ.m⁻²) enquanto que na fase de desenvolvimento de vagem representou apenas 13,9% do saldo de radiação (1,9 MJ.m⁻²). O fluxo de calor no solo apresentou maiores valores durante a fase S-V2 (fase inicial), equivalentes a 17,2% do saldo de radiação (2,6 MJ.m⁻²) e menores valores na fase de desenvolvimento de vagem aproximando-se de 3,0% do saldo de radiação (0,4 MJ.m⁻²).

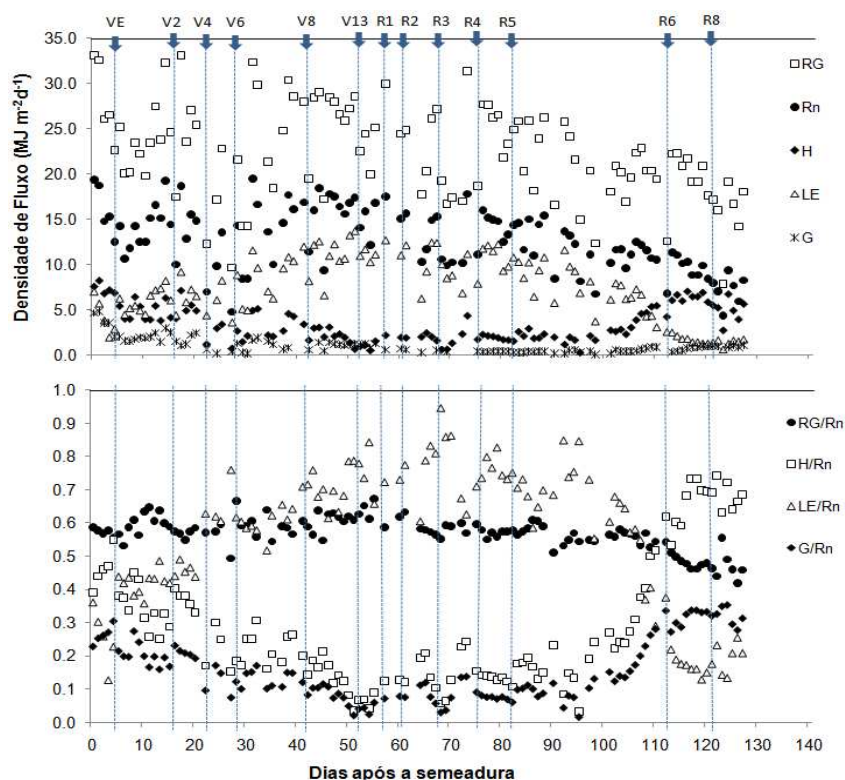


Figura 5 - Variações diurnas da radiação solar global (Rg), saldo de radiação (Rn), densidade do fluxo de calor latente (LE), de calor sensível no ar (H) e de calor sensível no solo (G) em função do número de dias após a semeadura da soja, cultivar FUNDACEP 53RR. Relações Rg/Rn, LE/Rn, H/Rn e G/Rn ao longo do ciclo da cultura da soja, durante o período 14/12/2009 a 28/04/2010, Rede Sulflux, Cruz Alta, RS.

Tabela 4 - Média diurna do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em MJ.m⁻².dia⁻¹, e suas relações com Rn, durante determinadas fases da cultura da soja. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010

Fases	Rg (MJ.m ⁻²)	Rn (MJ.m ⁻²)	LE (MJ.m ⁻²)	H (MJ.m ⁻²)	G (MJ.m ⁻²)	Rg/Rn (%)	LE/Rn (%)	H/Rn (%)	G/Rn (%)
S-V2	25,3	14,9	5,4	5,7	2,6	58,9	36,7	38,5	17,2
V2-V13	23,6	14,0	8,9	2,9	1,2	59,2	63,3	20,7	8,3
R1-R2	23,7	14,5	10,4	2,0	0,7	61,1	71,5	14,5	4,8
R3-R4	23,5	13,4	10,5	1,9	0,4	57,4	78,9	13,9	3,0
R5-R6	20,8	11,4	6,5	3,3	0,5	54,7	55,4	31,2	4,2
Maturação	16,4	7,7	1,4	5,3	1,0	47,1	18,3	68,7	12,8
Ciclo	22,4	12,8	7,3	3,5	1,1	56,7	55,7	29,2	14,4

S-V2 = semeadura da soja a primeira folha completamente expandida; V2-V13 = primeira folha completamente expandida ao final do período vegetativo; R1-R2 = florescimento; R3-R4 = desenvolvimento da vagem; R5-R6 = desenvolvimento do grão; maturação fisiológica a colheita e ciclo da soja.

Na Figura 6 pode ser observado o fechamento do balanço de energia para todo o ciclo da cultura da soja (14/12/2009 a 28/04/2010). Foi obtido o coeficiente de regressão linear entre a energia utilizada (LE+H) e a disponível (Rn-G) de 0,94. Os valores encontrados neste estudo estão de acordo com os encontrados na literatura (MEYERS; HOLLINGER, 2004; SUYKER; VERMA, 2008). Aubinet et al. (2000) relatam que não é esperado o fechamento total do balanço de energia, porque na contabilização dos resultados nem todas as trocas e processos envolvidos são considerados no sistema solo-planta-atmosfera.

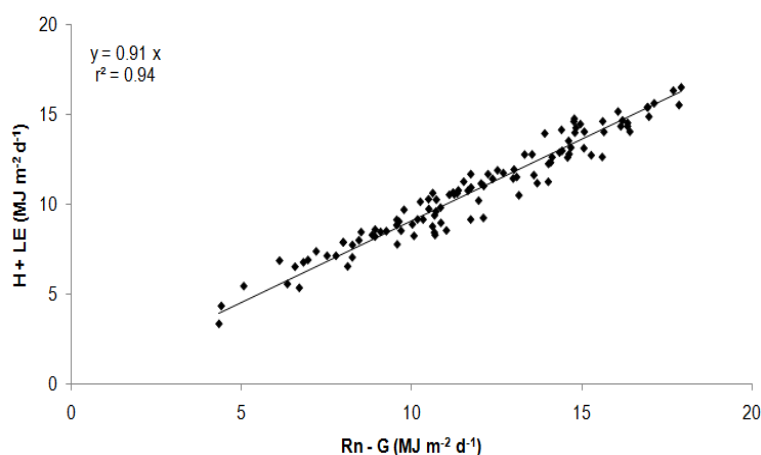


Figura 6 - Fechamento do balanço de energia para valores diurnos durante o ciclo da soja. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

3.4. Razão de Bowen

Na Figura 7 pode ser observada a variação dos componentes do balanço de energia de H e LE em termos da Razão de Bowen (β). Valores da Razão de Bowen no início do ciclo variaram de 0,52 a 3,7, com média de 1,21. Esta variação foi menor para o período de desenvolvimento da vagem, quando os valores de β oscilaram entre 0,06 e 0,39. Ao final do ciclo o valor médio de β foi de $3,39 \pm 0,34$, com máximo de 5,35 e mínimo de 2,60. Os valores obtidos ao longo do ciclo fenológico da soja foram próximos aos encontrados por Suyker e Verma (2008), os quais obtiveram ao início e final do ciclo da soja valores de β , variando de 0,2 a 8,0.

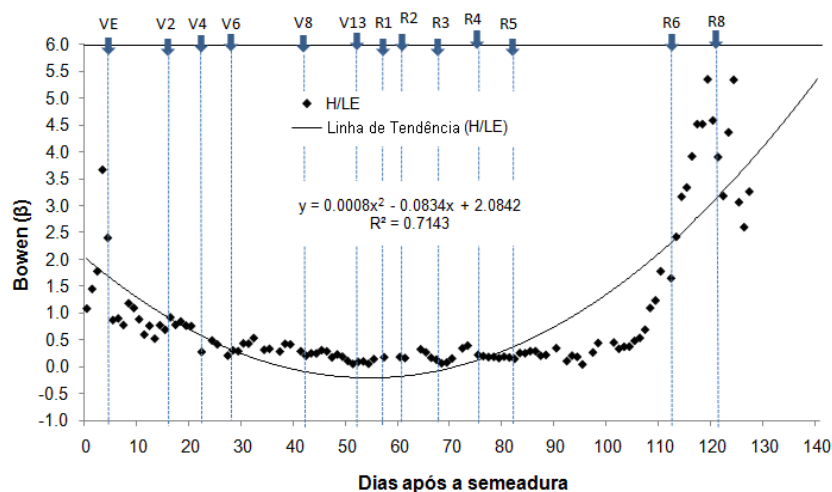


Figura 7 - Variação dos valores médios diários da Razão de Bowen ao longo do período de cultivo da soja. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

Logo, a cultura de soja não sofreu restrições hídricas, principalmente, nas fases mais críticas ao déficit hídrico, ou seja, quando a cultura possui as maiores altura e índice de área foliar (Figura 4).

3.5. Evapotranspiração da soja (ETc)

A evapotranspiração da soja apresentou aumento gradativo em seus valores até a cultura da soja concluir a fase de desenvolvimento vegetativo (V13), a partir de onde a ETc reduz. Este comportamento pode ser explicado pelo desenvolvimento das plantas (Figura 3), pois na fase (V2-V13) do ciclo vegetativo a soja apresentou maior variação em seu crescimento, aumentando o índice de área foliar e, consequentemente, a evapotranspiração da cultura. Ao atingir a fase de floração (R1), a cultura não apresentou mudanças significativas na variação de sua altura, estabilizando então o índice de área foliar e a evapotranspiração da cultura. Ao iniciar a fase de maturação fisiológica (R8), a soja necessitou de uma menor energia fotossintética, o que fez com que a ETc diminuísse nesse período. Berlato et al. (1986) relatam que a necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm.dia⁻¹), decrescendo após esse período.

Como pode ser visto na Tabela 5 referente à evapotranspiração da cultura média e acumulada durante as fases fenológicas, e na Figura 8, referente ao comportamento diário da evapotranspiração da cultura, a fase de desenvolvimento da vagem (R3-R4) do ciclo da cultura obteve maiores valores diários de ETc, sendo que o valor médio para esse período ficou em torno de 4,5 mm.dia⁻¹, totalizando 62,5 mm ao final da fase. Para as fases (S2-V2), (V2-V13), (R1-R2), (R5-R6) e maturação fisiológica a colheita foram registrados valores médios iguais a 3,7; 3,8; 4,2; 2,8 e 0,9 mm.dia⁻¹, com totais no término das fases equivalentes a 40,7; 152,2; 46,4; 108,6 e 13,2 mm, respectivamente. Ao final do experimento foi observado que a ETc foi igual a 423,6 mm, com pico máximo de ETc de 6,58 mm.dia⁻¹ ao final da fase vegetativa (V13). Suyker e Verma (2010) observaram evapotranspiração durante o ciclo da soja em plantio de sequeiro e irrigado variando entre 420 a 441 e 430 a 474 mm, respectivamente. Já para valores diários encontraram picos da evapotranspiração da soja em condições de sequeiro e irrigado de 5,8 e 6,9 mm.dia⁻¹, respectivamente.

Tabela 5 - Valores médios de ETc diária e total para cada fase do ciclo da soja

Fases	Duração (dias)	ETcdiaria (mm.d ⁻¹)	ETc total (mm)
S-V2	15	3,7 (± 0,79)	40,7
V2-V13	40	3,8 (± 0,22)	152,2
R1-R2	11	4,2 (± 0,57)	46,4
R3-R4	14	4,5 (± 0,37)	62,5
R5-R6	39	2,8 (± 0,22)	108,6
Maturação	16	0,9 (± 0,20)	13,2
Ciclo	135	3,3	423,6

S-V2 = semeadura da soja a primeira folha completamente expandida; V2-V13 = primeira folha completamente expandida ao final do período vegetativo; R1-R2 = florescimento; R3-R4 = desenvolvimento da vagem; R5-R6 = desenvolvimento do grão; maturação fisiológica a colheita e ciclo da soja.

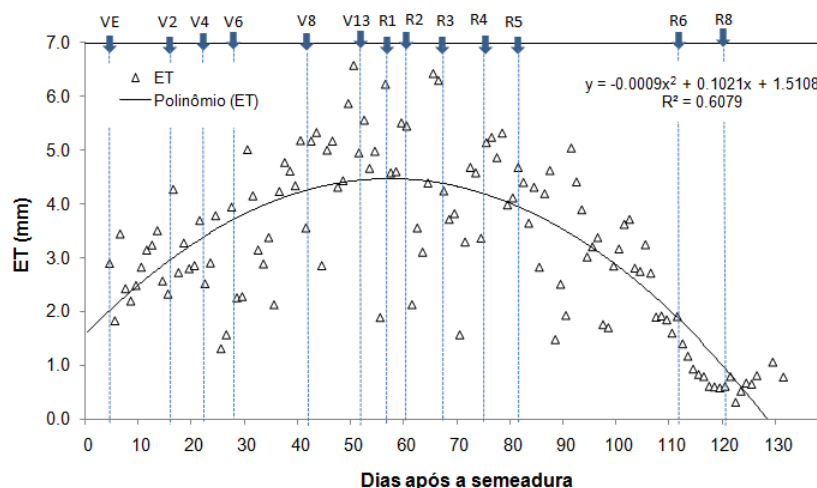


Figura 8 - Comportamento diário da evapotranspiração da cultura.

4. CONCLUSÃO

O saldo de radiação (R_n) para todo o ciclo da soja representou mais de 50% da radiação solar global, sendo que a evapotranspiração representa mais da metade do R_n , seguido do aquecimento do ar e do aquecimento do solo.

O balanço de energia da cultura apresentou adequado fechamento, indicando que o método da Covariância dos Vórtices Turbulentos foi capaz de reproduzir os fluxos de energia acima da cultura de soja de maneira satisfatória.

As contribuições de H e de LE em termos da razão de Bowen, indicaram que a cultura não sofreu restrições hídricas durante os estádios mais sensíveis ao déficit hídrico.

A evapotranspiração diária da cultura foi maior na fase V13, enquanto que para todo o ciclo de desenvolvimento da soja alcançou valor próximo aqueles obtidos por outros pesquisadores.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUBINET, M.; GRELLÉ, A.; IBROM, A. et al. Estimatives of the annual net carbon and water exchange of forests: the euroflux methodology. **Advances in Ecological Research**, New York, v. 30, p. 113-175, 2000.

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

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

BARNI, N.A. Práticas agrícolas para minorar o impacto das secas e racionalizar a irrigação. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1999. p. 116-125.

BERLATO, M.A. Condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 11-24.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque classe A e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; LIGO, M.A.V. et al. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, p. 61-70, 2003.

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.

CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F.; KLOSOWSKI, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira de Agrometeorologia**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 735-743, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FERNANDES, E.J. Estudo do calor sensível e latente obtidos por intermédio da razão de Bowen em uma cultura de soja irrigada. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 3, p. 281-296, 2007.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 3, p. 411-418, 1991.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W.A. et al. Balanço de energia em solo cultivado com feijão caupi no brejo Paraibano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004. **Anais...** 2004.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

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.

NEVES, L.O. **Fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente na cultura de caupi (*Vigna unguiculata* L.)**. 2006. 57 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NEVES, L.O. **Estimativa dos fluxos de massa e energia em uma cultura de soja (*Glycine max* (L) Merrill) utilizando-se o modelo CABLE**. 2011. 91 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NEVES, L.O.; COSTA, J.M.N.; ANDRADE, V.M.S. et al. Balanço de energia em uma cultura de feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.) no estado do Para. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, p. 21-30, 2008.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

RIGHI, E.Z.; ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, p. 367-379, 2007.

REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO DO RS E SC – ROLAS. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA, 1998. 223 p.

SAN JOSÉ, J.J.; BRACHO, R.; MONTES, R.; NIKONOVA N. Comparative energy exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L.) Walp cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco llanos. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 116, p. 197-219, 2003.

SANTOS, E.O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da Floresta Amazônica**. 1999. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

SILVA, T.J.A.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, C.R.; et al. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de bowen. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 392-403, 2007.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agric. For. Meteorol.**, v. 148, p. 417-427, 2008.

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.

TODD, R.W.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 335-348, 2000.

YOSHIMOTO, M.; OUE, H.; KOBAYASHI, K. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, p. 226-246, 2005.

CAPÍTULO 2

CALIBRAÇÃO DO MODELO CROPGRO-SOYBEAN PARA CONDIÇÕES DE SOLO E CLIMA EM CRUZ ALTA, RS

Resumo: A tarefa de calibração dos modelos de simulação do crescimento de culturas com embasamento fisiológico, como o modelo CROPGRO é a principal dificuldade enfrentada pelos usuários. Tal fato ocorre, pois os modelos requerem dados experimentais confiáveis, que representem bem as condições típicas da área para sua aplicação. O presente trabalho teve como objetivo calibrar o modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento, CROPGRO-Soybean, para a cultivar de soja FUNDACEP 53RR, para o Rio Grande do Sul. O ajuste dos coeficientes genéticos do modelo foi feito a partir de experimento realizado no Campo Experimental da Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigo (FUNDACEP), em Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul (28°36'S, 53°40'W e altitude 409 m), durante a safra de 2009/10. As simulações foram baseadas em dados meteorológicos diários das temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação pluvial e radiação solar global, características físico-hídricas do solo e dados de manejo da cultura. Por meio das análises realizadas nas simulações, foi identificado que o modelo CROPGRO-Soybean foi eficiente na simulação da ocorrência dos estádios fenológicos e do rendimento de grãos da cultivar de soja avaliada para as condições de solo e clima de Cruz Alta, RS.

Palavras-chave: Simulação por computador, fenologia, índice de área foliar, rendimento de grãos, soja.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas são ferramentas que foram desenvolvidas para múltiplas aplicações na pesquisa

agropecuária (JONES et al., 2003). Segundo Hoogenboom et al. (2003), o Sistema de Suporte à Tomada de Decisão para a Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), que inclui um conjunto de modelos de crescimento de culturas, tem sido usado amplamente nos últimos anos por pesquisadores de diferentes países, por ser uma ferramenta computacional útil na avaliação das opções de manejo em função das condições ambientais. Dentre os modelos de simulação que compõe o DSSAT, destaca-se o CROPGRO, que é um modelo genérico para leguminosas e permite a simulação do crescimento e desenvolvimento da soja, amendoim e feijão, entre outras (JONES et al., 2003).

Exemplos da eficiência da simulação do modelo CROPGRO na cultura da soja foram demonstrados por Ruiz-Nogueira et al. (2001) que utilizaram o modelo CROPGRO-Soybean para estimar o crescimento e a produção da soja em condições limitantes de água para três cultivares em três locais de diferentes condições climáticas do nordeste da Espanha, estabelecendo, assim, melhores datas de semeadura, conforme as precipitações pluviais e os manejos de irrigação. Ao testar o desempenho de dois modelos de simulação, sendo um deles o CROPGRO, Nielsen et al. (2002) verificaram que após a calibração, em decorrência da variabilidade na precipitação pluvial, o modelo se mostrou eficiente na predição de reduções na evapotranspiração. Os autores indicaram o modelo CROPGRO nas avaliações do potencial de rendimento da soja para as condições dos Estados Unidos da América (Grandes Planícies Centrais).

Testando o desempenho do modelo CROPGRO para prever rendimento da soja, usando dados climáticos, de solo, de manejo e variedade de sementes, Jagtap e Jones (2002) observaram que o modelo apresentou o desempenho de 95% (média de 17 anos), para previsão das variações interanuais no rendimento da soja, principalmente em quebras de safras por déficits hídricos. Ao comparar dados obtidos no campo e simulados no CROPGRO, Boote et al. (2003) verificaram que, a combinação de condições ambientais e melhorias genéticas da cultura propiciaram aumentos de 13 a 17% no rendimento.

No Brasil, Dallacort et al. (2005, 2006 e 2008) utilizaram o modelo de simulação de crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (CROPGRO-soybean) calibrado para a região de Palotina, PR, para estimar a produtividade e determinar as melhores épocas de semeadura para quatro cultivares em cinco datas de semeadura, durante 25 safras (1974 a 1999). Grossi et al. (2010) analisaram, por meio do CROPGRO-Soybean, a produtividade real e potencial da cultura da soja na Amazônia

Legal sob condições de incremento de CO₂ atmosférico somado a disponibilidade hídrica.

Jones et al. (2003) apresentam um conjunto mais vasto de trabalhos organizados por Continente, e categorizados por classe de aplicação (alteração e variabilidade climática, manejo de irrigação e da fertilização, segurança alimentar, entre outros) que envolve os modelos de simulação de culturas existentes no DSSAT (CERES e CROPGRO), no qual, inclui também aplicações com a cultura da soja.

A vantagem em utilizar modelos dessa natureza está na possibilidade de manipulação dos fatores ambientais que influenciam no desenvolvimento e na produtividade da soja. Após calibração e teste, o modelo CROPGRO possibilita a realização de simulações que consideram a influência das condições climáticas no crescimento, no desenvolvimento e no rendimento da soja, por meio da interação complexa com o solo e com as práticas de manejo.

Entretanto, a tarefa de calibração dos modelos de simulação do crescimento de culturas com embasamento fisiológico, como o modelo CROPGRO é a principal dificuldade enfrentada pelos usuários, tal fato ocorre, pois os modelos requerem dados experimentais confiáveis, que represente bem as condições típicas da área para sua aplicação. Com base no exposto objetivou-se com este trabalho, calibrar o modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento, CROPGRO-Soybean, para a cultivar de soja FUNDACEP 53RR, cultivada em Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do modelo CROPGRO-Soybean

Foi utilizado o modelo CROPGRO-Soybean (*Crop-Environment Resource Synthesis*), que está inserido no sistema DSSAT, versão 4.0.2.0 (HOOGENBOOM, 2004), que simula o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da soja (*Glycine max* L. Merrill), conforme Figura 1. A construção dos arquivos necessários para a simulação foi descrita detalhadamente por Boote et al. (1998a, 1998b e 2003). O modelo permite as simulações para as condições específicas de cada solo, dos principais processos físicos e fisiológicos da cultura, tais como fotossíntese, respiração, acumulação e partição da matéria seca, fenologia, crescimento foliar, de caules e de

raízes, extração de água do solo, evapotranspiração e produção da soja, em resposta à variação dos dados, meteorológicos diários de precipitação pluvial, radiação solar global, temperaturas máxima e mínima do ar, os quais foram fornecidos ao modelo como dados de entrada.

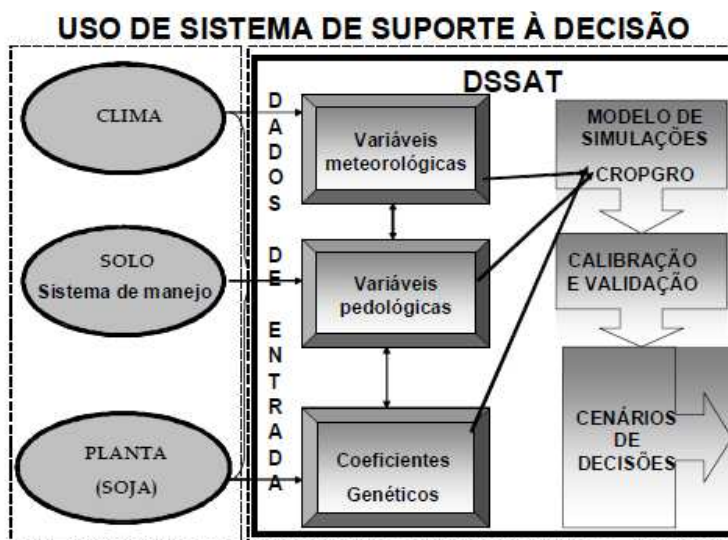


Figura 1 - Diagrama ilustrativo das variáveis que integram a base de dados do sistema atmosfera-solo-planta para as simulações do modelo CROPGRO-Soybean, no DSSAT.

As simulações foram realizadas para as condições obtidas no Campo Experimental da Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigô (FUNDACEP), localizada no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, cujas coordenadas geográficas são: 28°36'Sul, e 53°40'Oeste e altitude média de 409 metros.

2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean

A calibração do modelo para as condições experimentais do presente trabalho foram efetuados a partir do ajuste nos coeficientes genéticos que caracterizam aspectos importantes da cultura, conforme recomendação de Hoogenbom et al. (2003) e Jones et al. (2003).

Para calibração dos coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean foram utilizados os dados da cultivar de ciclo precoce, FUNDACEP 53RR, semeada em 14/12/2009, com espaçamento de 0,40 m entre linhas, e população de 300 mil plantas por hectare, cultivada em sistema de plantio direto. Essa cultivar foi desenvolvida pela Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP) cujas principais características agronômicas encontram-se listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características agronômicas da cultivar FUNDACEP 53RR

Características principais	FUNDACEP 53RR*
Grupo de maturação	6,1
Altura da planta	75 cm (baixa)
Peso médio de 100 grãos	15,0 g
Acamamento	Resistente
Densidade de semeadura	28-32 plantas/m ²
Resposta a adubação	Alta
Época de semeadura	Novembro
Ciclo	Precose
Área de adaptação	RS

Fonte: Adaptado de COTRISOJA (2011).

* Cultivar com excelente engalhamento, ampla estabilidade e adaptabilidade, boa tolerância ao estresse hídrico, cultivar geneticamente modificada para tolerância ao herbicida Glifosato.

As variáveis meteorológicas: temperatura máxima e mínima do ar, radiação global e precipitação pluvial e os estádios da cultura no período do experimento (Figura 2); e os dados como classificação do solo, análise química e física (Tabela 2) foram obtidos do experimento de campo localizado na FUNDACEP.

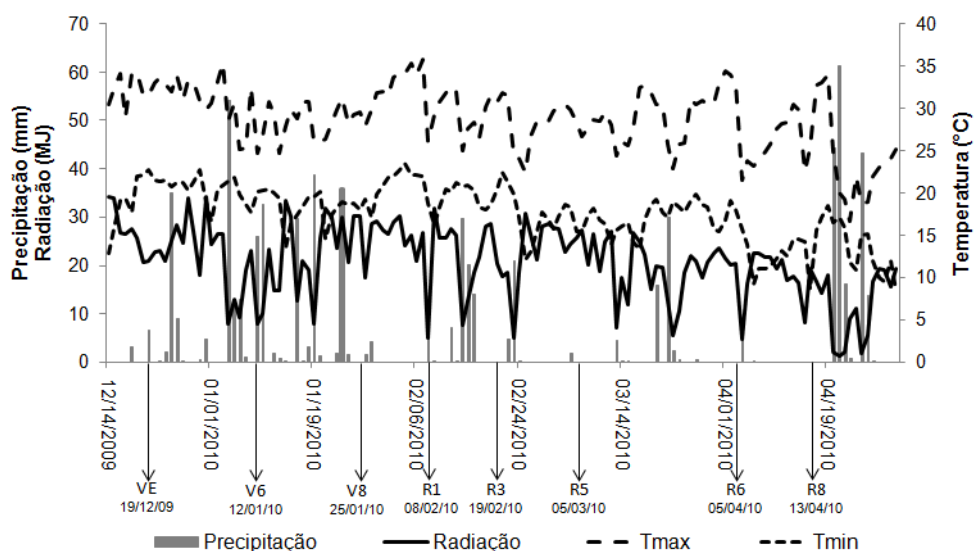


Figura 2 - Dados meteorológicos observados durante o ciclo da cultivar FUNDACEP 53RR para o ano de 2009/2010.

Tabela 2 - Características físico-hídricas do solo encontrado no local de estudo

Profundidade (cm)	DG (g.cm ⁻³)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)	Fração do solo (%)		
				Areia	Silte	Argila
5	2,50	0,35	0,17	28,57	39,46	31,95
12	2,48	0,34	0,17	27,50	41,34	31,15
60	2,46	0,37	0,22	24,69	46,79	28,505

Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2006).

DG = densidade global; CC = capacidade de campo e PMP = ponto de murcha permanente. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico.

A correção do solo e a adubação da área experimental foram feitas por meio de análise do solo em concordância com as recomendações de ROLAS (1998). Ou seja, utilizando-se 350 kg da formulação NPK de 0-20-20 por hectare na semeadura. O cultivo antecedente foi de aveia. A área foi dessecada com aplicação do herbicida glifosato. Foi realizado o controle das plantas invasoras remanescentes, quando necessário, com a aplicação do mesmo herbicida. O controle de doenças e pragas foi realizado de acordo com as práticas culturais recomendadas para o cultivo da soja,

garantindo que o experimento ocorresse com a mínima interferência desses fatores no experimento.

Foram registradas as datas dos estágios e respectivas fases fenológicas da soja, durante os meses de dezembro de 2009 a abril de 2010 (Tabela 3). Para cada uma dessas datas foi determinada a biomassa. O índice de área foliar (IAF; $\text{cm}^2 \text{folha} \cdot \text{cm}^{-2} \text{solo}$) foi calculado em função de amostras de folhas obtidas em 1 m e passadas no medidor de área foliar. Na maturação fisiológica, foi determinada a massa de 100 sementes (g), produtividade ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Tabela 3 - Datas dos estágios e respectivas fases fenológicas da soja na safra 2009/10

Soja	Data	DAP
Semeadura	14/12/09	0
Emergência	19/12/09	5
V2- Segundo nó; primeiro trifólio aberto	30/12/09	16
V4 - Quarto nó; terceiro trifólio aberto	06/01/10	23
V6 - Quinto nó; terceiro trifólio aberto	11/01/10	28
V7 - Sexto nó; terceiro trifólio aberto	20/01/10	37
V8 - Sétimo nó; terceiro trifólio aberto	25/01/10	42
V13 - Último nó com trifólio aberto, antes da floração	04/02/10	52
R1 - Início da floração até 50% das plantas com uma flor	08/02/10	56
R2 - Floração plena. Maioria dos racemos com flores abertas	12/02/10	60
R3 - Final da floração. Vagens com até 1,5 cm de comprimento	19/02/10	67
R4 - Maioria das vagens no terço superior com 2 - 4 cm, sem grãos perceptíveis	27/02/10	75
R5.1 - Grãos perceptíveis ao tato a 10% da granação	05/03/10	81
R5.2 - Maioria das vagens com granação de 10% - 25%	12/03/10	88
R5.3 - Maioria das vagens entre 25% e 50% de granação	19/03/10	95
R5.4 - Maioria das vagens entre 50% e 75% de granação	25/03/10	101
R6 - Vagens com granação de 100% e folhas verdes	05/04/10	112
Maturação fisiológica	13/04/10	120
Colheita	28/04/10	135

Fonte: Adaptado de Tsukahara e Kochinski (2007).

DAP - Dias após a semeadura.

A sequência de procedimentos para obter a calibração dos coeficientes genéticos foi: 1) selecionar inicialmente os coeficientes genéticos para determinado genótipo a partir de outros que estejam no mesmo grupo de maturação ou que apresentem crescimento em área de adaptação similar; 2) executar o modelo para o local ou tratamento; e 3) comparar os valores estimados e observados de cada tratamento e verificar seu ajuste. Se o ajuste não for adequado, deve-se ajustar, inicialmente, a data

prevista de florescimento, em seguida, a data prevista de maturação e, finalmente, o ajuste dos componentes do rendimento, conforme recomendação de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003). Esse procedimento foi feito por um processo de tentativa e erro, ou seja, foram atribuídos valores a cada coeficiente, e verificado se o modelo gerava resultados próximos aos medidos em condições de campo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean

Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes genéticos da FUNDACEP 53RR ajustados na calibração do modelo CROPGRO-Soybean para a estimativa do crescimento e do desenvolvimento da soja, para as condições de solo e de clima de Cruz Alta, RS. Os coeficientes genéticos CSDL, PPSEN, EM-FL, FL-SH, FL-SD, SD-PM e FL-LF definem o desenvolvimento da cultura, enquanto que LFMAX, SLAVAR e SIZLF definem o crescimento vegetativo; os coeficientes XFRT, WTPSD, SFDUR, SDPDV e PODUR estão relacionados com a definição do crescimento reprodutivo. Inicialmente foram calibrados os coeficientes genéticos e, posteriormente, realizadas as calibrações de variáveis de crescimento da soja. Tal sequência foi seguida devido a dependência entre as variáveis de crescimento com a fenologia da cultura.

Tabela 4 - Coeficientes genéticos da cultivar Fundacep 53RR calibrados no CROPGRO-Soybean, em Cruz Alta, RS, 2009/2010

Cultivar	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF
FUNDACEP 53RR	12.83	0.303	33	7.5	18	42	18
LFMAX	SLAVAR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
1.03	355	170	1	0.15	13	2.05	8

em que CSDL, também definida como CSDVAR, representa o comprimento crítico do dia, acima do qual o processo de desenvolvimento reprodutivo não é afetado (horas); PPSEN, inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para fotoperíodo com o tempo (1/hora); EM-FL, período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (R1) (dias fototermais); FL-SH, período entre o aparecimento da primeira flor e a primeira vagem (R3) (dias fototermais); FL-SD, período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação da semente (R5) (dias fototermais); SD-PM, período entre o início da formação da semente e a maturidade fisiológica (R7) (dias fototermais); FL-LF, período entre o aparecimento da primeira flor (R1) e final da expansão foliar (dias fototermais); LFMAX, taxa máxima de fotossíntese da folha a taxa ótima de temperatura 30°C; SLAVARN, área foliar específica sob condições padrão de crescimento; SIZLF, tamanho máximo da folha completamente expandida (cm²); XFRT, máxima fração do crescimento diário que é particionada para a semente mais a vagem; WTPSD, peso máximo por semente (g); SFDUR, duração do período de enchimento das sementes nas vagens, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); SDPDV, média de sementes por vagem, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); PODUR, tempo necessário para a cultivar alcançar condições ideais de vagens (dias fototermais).

3.2. Avaliação da calibração fenológica

A calibração fenológica do modelo foi conduzida entre comparações do crescimento e o acúmulo de biomassa real e a simulada, os dias contabilizados entre o plantio até o florescimento, a definição do início da formação da vagem e enchimento de grão e, por fim, aspectos biofísicos caracterizadores da maturação fisiológica. Para isso, foram utilizados os dados observados de florescimento, início da formação da vagem e enchimento de grão, além da maturação fisiológica obtidas no experimento de campo realizado pela Fundacep, Cruz Alta, RS. Conforme apresentado na Tabela 5, o modelo simulou com precisão o desenvolvimento fenológico da cultivar de soja FUNDACEP 53RR. A proximidade dos valores simulados e observados no campo referente aos estádios fenológicos da soja também foram encontrados por Martorano, (2007) para a cultivar Fepagro RS-10. Assim, a estimativa da fenologia da cultura torna-se forte indicador de seu desempenho quando os coeficientes genéticos estiverem adequadamente calibrados.

Tabela 5 - Dados fenológicos para a soja, observados e simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean

Fenologia (dias)	Observado	Simulado	Diferença (dias)
Florescimento	56	55	1
Formação da vagem	67	66	1
Enchimento de grão	81	80	1
Maturação fisiológica	120	118	2

3.3. Avaliação do crescimento

Foram realizadas calibrações do modelo CROPGRO-Soybean para a determinação da massa de matéria seca da parte aérea (MS) e índice de área foliar (IAF), na variedade cultivada FUNDACEP 53 RR, em Cruz Alta, RS, na safra 2009/2010. Na Figura 3 pode ser comparada as variáveis observadas referentes ao

crescimento da cultura (MS e IAF) com àquelas simuladas para o conjunto de dados obtidos no experimento. De acordo com os resultados do modelo a biomassa é superestimada. Algumas discordâncias entre biomassa observada e simulada foram informadas por (MARTORANO, 2007) e (MERCAU et al., 2007). Para o IAF, as simulações do modelo acompanharam de perto as observações de campo durante a maior parte do ciclo de vida da soja. É observada nos resultados do modelo a redução do IAF devido, provavelmente, à senescência natural das folhas, 80 dias após da semeadura. Nas observações realizadas em campo, o pico do IAF foi de $6,17 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$. Já para as simulações do modelo do CROPGRO-Soybean o pico de IAF foi de $5,9 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$. Os resultados estão de acordo, em parte, com trabalhos anteriores realizados com modelo CROPGRO-Soybean (MARTORANO, 2007).

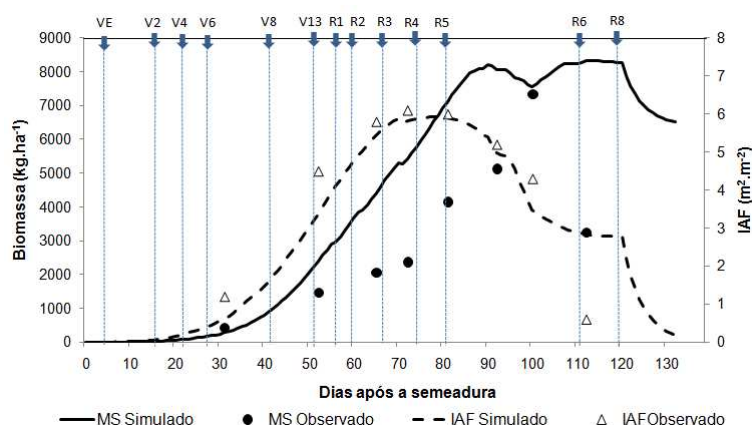


Figura 3 - Valores observados e simulados, pelo modelo CROPGRO-Soybean, das variáveis (MS, $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$; IAF, $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) para o experimento em Cruz Alta, RS, 2009/2010.

A relação entre as observações e as simulações do IAF, e da biomassa acima do solo, foram descritos pela inclinação e o coeficiente de determinação (R^2) das linhas de regressão original (Figura 4). Os valores simulados para a IAF podem ser considerados adequados, já que revelam a mesma tendência que os observados. Os valores simulados de MS foram os que apresentaram as maiores dispersões. Assim, pode-se inferir que o modelo foi capaz de explicar mais de 77% da variação do IAF e mais de 64% da variação da biomassa da cultura.

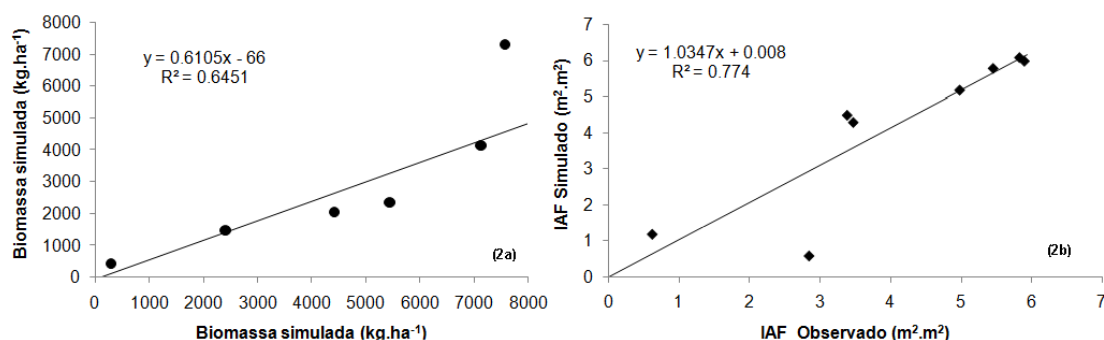


Figura 4 - Relação entre os valores da massa de matéria seca da parte aérea (MS; 2a) e índice de área foliar (IAF; 2b), medidos em campo e estimados pelo modelo CROPGRO-Soybean.

Na Tabela 6 estão contidos os resultados da produção de fitomassa e de grãos, e do índice de colheita (IC). Os resultados contidos na Tabela 6 indicam que o modelo CROPGRO-Soybean estimou satisfatoriamente o rendimento de grãos da cultivar de soja FUNDACEP 53 RR, para as condições de solo e de clima de Cruz Alta, RS, que resultou numa diferença de 10 kg ha⁻¹ entre o valor observado (2848 kg.ha⁻¹) e o simulado (2838 kg.ha⁻¹) pelo modelo.

Tabela 6 - Produção de matéria seca no estágio R5.4, rendimento de grãos, e o índice de colheita (IC)

Parâmetros	Observado	CROPGRO
Rendimento de grãos (kg.ha ⁻¹)	2.848	2.838
Biomassa (R5.4) (kg.ha ⁻¹)	7.330	7.570
Índice de colheita (%)	38,9	37,5

Analizando os resultados obtidos para o índice de colheita (IC) na Tabela 6, verifica-se que o modelo representou bem a razão entre o rendimento biológico (produção total de fitomassa acima do solo, R5.4) e o rendimento de grãos (parte colhida e comercializada da cultura).

4. CONCLUSÃO

O modelo CROPGRO-Soybean foi eficiente na simulação da ocorrência de estádios fenológicos da cultivar de soja FUNDACEP 53 RR, para as condições de solo e clima de Cruz Alta, RS.

O modelo subestimou o índice de área foliar máximo e superestimou a matéria seca aérea da soja em relação aos observados em campo.

O modelo estimou satisfatoriamente o rendimento de grãos da cultura da soja, cultivada em Cruz Alta, RS.

Para fins de melhorar o desempenho da simulação da biomassa e índice de área foliar, sugere-se a utilização da técnica GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation) (MERTENS et al., 2004).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Eds.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: M. Dekker, 1998a. p. 651-691.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. p. 99-128.

BOOTE K.J.; JONES J.W.; BATCHELOR, W.D. et al. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: links to field performance and genomics. **Agronomic Journal**, v. 95, p. 32-51, 2003.

COOPERATIVA TRITÍCOLA TAPERENSE LTDA. – COTRISOJA. Disponível em: <<http://www.cotrisoja.com.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; FARIA, R.T. et al. Ajuste e teste dos coeficientes genéticos do modelo de simulação Cropgro-soybean, para a região Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 363-371, 2005.

DALLACORT, R.; FREITAS P.S.L.; FARIA R.T. et al. Utilização do modelo Cropgro-soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 583-589, 2006.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; GONÇALVES, A.C.A. et al. Níveis de probabilidade de rendimento de quatro cultivares de soja em cinco datas de semeadura. **Acta Sci. Agron.** Maringá, v. 30, n. 2, p. 261-266, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

GROSSI, M.C.; CHAVES, E.; JUSTINO, F.B.; SILVA, R.F. Influência das mudanças climáticas na produtividade da soja na Amazônia Legal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer**: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii, 2003.

JAGTAP, S.S.; JONES, J.W. Predicting regional soybean yield and production: Adaptation of the CROPGRO soybean simulation model and scaling up yields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 93, p. 78-85, 2002.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

MARTORANO, L.G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do Sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e Simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MERCAU, J.L.; DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.J. et al. Predicting on farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Res.**, v. 100, p. 200-209. 2007.

NIELSEN, D.C.; MA, L.; AHUJA, L.R.; HOOGENBOOM, G. Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRC models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 6, p. 1234-1243, 2002.

REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO DO RS E SC – ROLAS. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CMPT, 1998. 223 p.

RUIZ-NOGUEIRA, B. et al. Calibration and use of CROPGRO-soybean model for improving soybean management under rainfed conditions. **Agric. Sys.**, v. 68, n. 2, p. 151-173, 2001.

CAPÍTULO 3

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SOJA: COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DA COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS E A ESTIMATIVA DO MODELO CROPGRO-SOYBEAN

Resumo: O desempenho do modelo CROPGRO-Soybean para simulação do uso da água, evapotranspiração e produtividade da soja foi avaliado por meio de dados decorrentes de experimentos de campo que utilizam a técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos conduzidos pela Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) em Cruz Alta, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (28°36'S e 53°40'W e altitude 409 m), no ano agrícola de 2009/2010. Os resultados indicam que o modelo superestima a evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura, provavelmente, por não representar de forma realística os resíduos culturais, indicando necessidade de ajustes em parâmetros do balanço de água no solo em sistema de plantio direto.

Palavras-chave: DSSAT, plantio direto, umidade do solo, evapotranspiração, soja.

1. INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas são aquelas que mais demandam por água, necessitando por isso, de grande empenho dos pesquisadores no desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a economia de água. Uma das alternativas para racionalizar o uso da água em projetos agrícolas surge a partir da estimativa da evapotranspiração da cultura.

Deve-se ressaltar que as necessidades hídricas das plantas variam de um período para outro, aumentando desde a emergência das plântulas, com valores muito

baixos, até o ponto de máxima área foliar onde se observa a maior evapotranspiração (KUSS, 2006). Os períodos mais críticos em relação à disponibilidade hídrica na cultura da soja são os que correspondem a germinação/emergência e a floração/enchimento de grãos (RIZZI, 2005).

Stone et al. (2006) apontam que as perdas de água por evapotranspiração da cultura e evaporação do solo dependem da quantidade de matéria seca da palha, apontando para maiores diferenças nos estádios iniciais e finais do ciclo da cultura. Berlato et al. (1986), determinando o consumo de água pela cultura da soja no Rio Grande do Sul, obtiveram 827 mm como valor médio de consumo de água para todo ciclo da cultura.

Para quantificar as perdas de água de superfícies cultivadas para a atmosfera são utilizados vários métodos, como razão de Bowen, método da covariância dos vórtices turbulentos e outros (PEREIRA et al., 1997), destinados à estimativa da evapotranspiração. O método da covariância dos vórtices turbulentos é capaz de medir diretamente os fluxos de calor latente na atmosfera em culturas agrícolas (BALDOCCHI, 2003; SAITO et al., 2005; NEVES, 2006; SAN JOSE et al., 2007).

Suyker e Verma (2008) observaram os fluxos de massa e energia em um sistema irrigado de rotação soja-milho durante quatro anos, utilizando o método da covariância dos vórtices turbulentos de maneira contínua. Os fluxos de calor latente, fluxos de calor sensível foram medidos por meio do anemômetro sônico unidirecional (Modelo R3) e do analisador de gás infravermelho (LI7500). Com base nos resultados é possível notar que a evapotranspiração, durante todo o ciclo das culturas, foram dependentes do índice de área foliar (IAF), onde a variabilidade interanual da evapotranspiração total foi mais bem correlacionada quando o IAF foi maior que 3.

Modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas são ferramentas que foram desenvolvidas para múltiplas aplicações na pesquisa agropecuária (HOOGENBOOM et al., 1999; JONES et al., 2003). A utilização de modelos de simulação para prever a produtividade de soja em eficiência de uso de água pode ser muito útil na gestão de aplicações de déficit irrigação em culturas agrícolas. Neste contexto, o modelo CROPGRO-Soybean (Crop-Environment Resource Synthesis) simula o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da soja para determinado local e clima, e é uma excelente alternativa para obter informações que auxiliem no planejamento e manejo do uso da água em projetos agrícolas (BOOTE et al., 1998).

As simulações do modelo CROPGRO-Soybean foram consideradas satisfatórias sob condições de estresse hídrico sazonal, irrigado e de sequeiro (MAVROMATIS et al., 2003; BOOTE et al., 2003). No entanto, a necessidade de pesquisas para testar o modelo de balanço hídrico utilizado, exige pesquisas em campos experimentais, monitoramento das condições edafoclimáticas e ajustamentos ao modelo quando necessário e possível. Sendo assim, a avaliação do modelo com dados medidos em campo utilizando o Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos deve fornecer uma melhor compreensão do modelo e suas aplicações. Neste sentido, desenvolveu-se o presente trabalho com o objetivo principal de avaliar a qualidade da estimativa da evapotranspiração da cultura da soja gerada pelo modelo CROPGRO-Soyben em relação aos dados de fluxos de calor latente medidos em condições de campo pelo método da covariância dos vórtices turbulentos, no Rio Grande do Sul.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo e do modelo CROPGRO-Soybean

O estudo foi desenvolvido com base em experimento conduzido na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP), localizada no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, a 28°36'Sul, e 53°40'Oeste e altitude média de 409 metros (Figura 1).



Figura 1 - Localização do sítio experimental no Estado do Rio Grande do Sul.

As simulações foram realizadas utilizando-se o modelo CROPGRO-Soybean (*Crop-Environment Resource Synthesis*) (BOOTE et al., 1998a, 1998b e 2003), versão 4.0.2.0, pertencente ao sistema DSSAT, que simula crescimento, desenvolvimento e produtividade da soja (HOOGENBOOM et al., 2003), conforme Figura 2. O modelo permitiu as simulações para as condições específicas de cada solo, dos principais processos físicos e fisiológicos da cultura, tais como fotossíntese, respiração, acumulação e partição da matéria seca, fenologia, crescimento foliar, de caules e de raízes, extração de água do solo, e evapotranspiração e produção da soja, em reposta à variação dos dados, meteorológicos diários, de precipitação pluvial, radiação solar global, temperaturas máxima e mínima do ar, os quais foram fornecidos ao modelo como dados de entrada. Também foram utilizados parâmetros de água no solo para avaliar o suprimento de água pela planta. A sensibilidade do modelo varia com a cultivar, a data de plantio, o manejo entre plantas e o manejo de irrigação.

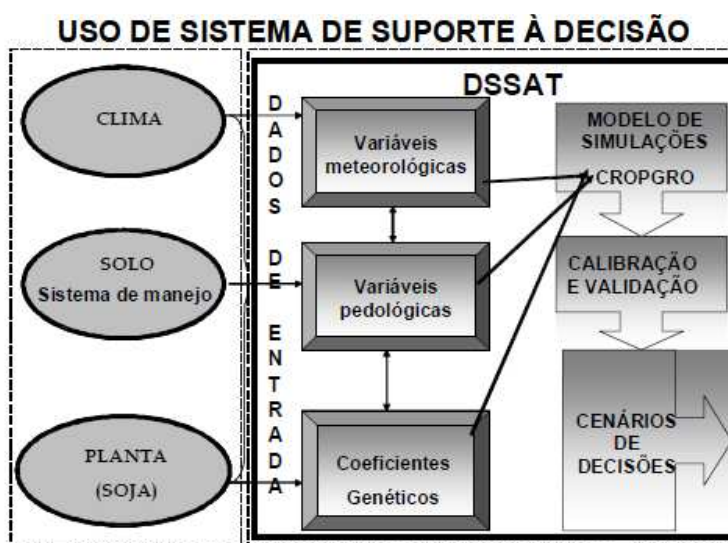


Figura 2 - Diagrama ilustrativo das variáveis que integram a base de dados do sistema atmosfera-solo-planta para as simulações do modelo CROPGRO-Soybean, no DSSAT.

2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean

A calibração do modelo para as condições experimentais do presente trabalho foram realizadas a partir do ajuste nos coeficientes genéticos que caracterizam aspectos

importantes da cultura, conforme recomendação de Hoogenbom et al. (2003) e Jones et al. (2003).

Para calibração dos coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean foram utilizado os dados da cultivar de ciclo precoce, FUNDACEP 53RR, semeada em 14 de dezembro de 2009, com espaçamento de 0,40 m entre linhas, e população de 300 mil plantas por hectares em sistema de plantio direto. Com este sistema de plantio todos os resíduos das culturas ficam depositados sobre o solo (Figura 3), para que depois da decomposição se incorporem lentamente à camada superficial do solo.



Figura 3 - Cultivo da soja no sistema de plantio direto (SD) em Cruz Alta. Na figura, observa-se a presença dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície.

O conjunto de informações fenológicas necessárias para a calibração dos coeficientes genéticos foi: florescimento, início da formação da vargem e enchimento de grão e, maturação fisiológica, índice de área foliar máximo e rendimento de grãos da cultura ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) (Tabela 1).

Tabela 1 - Duração do período semeadura - florescimento (dias), semeadura - início da formação de grão, semeadura - início da formação da vargem semeadura - maturação fisiológica (dias), índice de área foliar máximo ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) e rendimento da cultura ($\text{kg}.\text{ha}^{-1}$), para a cultivar Fundacep 53R

Parâmetros da cultura	FUNDACEP 53RR
Florescimento (dias)	56
Formação da vargem (dias)	67
Enchimento de grão (dias)	81
Maturação fisiológica (dias)	120
Índice de área foliar máximo ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)	6.1
Rendimento de grãos ($\text{kg}.\text{ha}^{-1}$)	2848

O conjunto das variáveis meteorológicas de entrada utilizado pelo modelo foi coletado a partir da estação meteorológica automática (EMA) montada a três metros de altura acima da cultura da soja numa torre micrometeorológica (Figura 4). Na Tabela 2 são apresentadas as variáveis meteorológicas mensais durante o ciclo da soja na safra de 2009/2010. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico - LVd3 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2006), com as características físico-hídricas apresentadas na Tabela 3.



Figura 4 - Sistema *Eddy Covariance* e estação meteorológica automática (EMA) instalada acima da cultura da soja numa torre micrometeorológica.

Tabela 2 - Médias meteorológicas mensais durante o ciclo da soja na safra de 2009/2010

Meses	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Rg (MJ.m ⁻²)	UR (%)	V (m.s ⁻¹)	Prec. (mm)
Dezembro	32,27	20,16	26,17	73,77	3,7	105,4
Janeiro	29,08	18,86	21,51	80,95	3,0	258,2
Fevereiro	29,95	19,59	22,38	80,37	2,8	109,2
Março	28,85	17,05	20,56	77,94	3,0	55,4
Abril	25,63	13,80	14,65	72,54	3,3	186,2

Tmax = temperatura máxima do ar ; Tmin = temperatura mínima do ar; UR = umidade relativa; V = velocidade do vento; Rg = radiação solar global; Prec. = chuva.

Tabela 3 - Características físico-hídricas do solo encontrado no local de estudo

Profundidade (cm)	DG (g.cm ⁻³)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)	Fração do solo (%)		
				Areia	Silte	Argila
5	2,50	0,35	0,17	28,57	39,46	31,95
12	2,48	0,34	0,17	27,50	41,34	31,15
60	2,46	0,37	0,22	24,69	46,79	28,505

DG = densidade global; CC = capacidade de campo e PMP = ponto de murcha permanente.

A correção do solo e a adubação da área experimental foram feitas por meio de análise do solo em concordância com as recomendações de Rolas (1998). Ou seja, utilizando-se 350 kg da formulação NPK de 0-20-20 por hectare na semeadura. O cultivo antecedente foi de aveia. A área foi dessecada com a aplicação do herbicida glifosato. Foi realizado o controle das plantas invasoras remanescentes, quando necessário, com a aplicação do mesmo herbicida. O controle de doenças e pragas foi realizado de acordo com as práticas culturais recomendadas para o cultivo da soja, garantindo que o experimento ocorresse com a mínima interferência desses fatores.

Com os coeficientes genéticos ajustados da cultivar FUNDACEP 53RR (Tabela 4), realizou-se a simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura da soja para a região estudada.

Tabela 4 - Coeficientes genéticos da cultivar Fundacep 53RR calibrados no CROPGRO-Soybean, em Cruz Alta, RS, 2009/10

Cultivar	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF
FUNDACEP 53RR	12.83	0.303	33	7.5	18	42	18
LFMAX	SLAVAR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
1.03	355	170	1	0.15	13	2.05	8

em que CSDL, também definida como CSDVAR, representa o comprimento crítico do dia, acima do qual o processo de desenvolvimento reprodutivo não é afetado (horas); PPSEN, inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para fotoperíodo com o tempo (1/hora); EM-FL, período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (R1) (dias fototermais); FL-SH, período entre o aparecimento da primeira flor e a primeira vagem (R3) (dias fototermais); FL-SD, período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação da semente (R5) (dias fototermais); SD-PM, período entre o início da formação da semente e a maturidade fisiológica (R7) (dias fototermais); FL-LF, período entre o aparecimento da primeira flor (R1) e final da expansão foliar (dias fototermais); LFMAX, taxa máxima de fotossíntese da folha a taxa ótima de temperatura 30°C; SLAVARN, área foliar específica sob condições padrão de crescimento; SIZLF, tamanho máximo da folha completamente expandida (cm²); XFRT, máxima fração do crescimento diário que é particionada para a semente mais a vagem; WTPSD, peso máximo por semente (g); SFDUR, duração do período de enchimento das sementes nas vagens, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); SDPDV, média de sementes por vagem, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); PODUR, tempo necessário para a cultivar alcançar condições ideais de vagens (dias fototermais).

2.3. Balanço de água no solo

O modelo CROPGRO-Soybean calcula o balanço hídrico no solo para cada uma das camadas do perfil, utilizando o modelo de Ritchie (1998). Esse modelo contabiliza a infiltração da chuva e, ou, a irrigação, o escoamento superficial, a absorção de água pelas raízes, a drenagem na zona radicular e a evapotranspiração.

O solo é dividido em camadas e o teor de água em cada camada varia entre um limite inferior (umidade no ponto de murcha permanente) e um limite superior (umidade de saturação). Se o teor de água em uma determinada camada estiver acima da umidade correspondente à capacidade de campo, a água é drenada para a próxima camada, utilizando o coeficiente de drenagem que é especificado no arquivo de solo (SOIL.SOL).

A infiltração da água de chuva ou da irrigação e o escoamento superficial são estimados pela modificação do método do número da curva de escoamento superficial SCS (*Soil Conservation Service*). A evapotranspiração de referência (ET_o) pode ser estimada pelos métodos de Priestley-Taylor ou Penman (FAO). Neste estudo, foi utilizado o método de Penman-FAO 56, em função da disponibilidade de dados.

2.4. Medidas micrometeorológicas

As medidas micrometeorológicas utilizadas no presente trabalho foram obtidas a partir da Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas). Os fluxos foram medidos de acordo com o método da covariância dos vórtices turbulentos (BALDOCCHI et al., 1988), do tipo *open path*, composto do analisador de gás infravermelho (IRGA) (LI-7500, Licor, Inc., Lincoln, NE) acoplado a um anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), usado para medir as flutuações dos componentes da velocidade do vento (Figura 2). Os sinais digitais desses instrumentos foram obtidos numa frequência de 10 Hz e, as médias obtidas em intervalos de 30 minutos usando um datalogger CR23X da Campbell Scientific, onde os dados foram armazenados para o posterior processamento.

2.5. Cálculos dos fluxos turbulentos

O método da covariância de vórtices turbulentos foi utilizado para medir o fluxo de CO₂, resultante da interação entre atmosfera e o campo agrícola de soja, assim como os fluxos de calor latente e sensível. Esse método permite determinar o fluxo convectivo de CO₂ (fotossíntese-respiração), da temperatura do ar (fluxo de calor sensível) e da umidade do ar (fluxo de calor latente). De acordo com os trabalhos de Neves (2006) e Carneiro (2007), os fluxos turbulentos de CO₂ (F_c), calor sensível (H) e calor latente (LE) podem ser expressos, respectivamente, da seguinte forma:

$$F_c = \overline{\rho w'c'} + (\text{termos de correção Webb})$$

$$H = \rho C_p \overline{w'T'}$$

$$LE = \rho L_v \overline{w'q'}$$

em que ρ é a densidade absoluta do ar; c' , o desvio instantâneo da concentração de CO₂ em relação à média; C_p , o calor específico do ar à pressão constante; w' , o componente vertical das flutuações da velocidade do vento; T' , o desvio instantâneo a partir da média da temperatura do ar; q' = desvio instantâneo a partir da média da umidade específica; e L_v , o calor latente de vaporização da água.

A barra representa a média do produto em um intervalo de amostragem.

A taxa de evapotranspiração da cultura foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente pelo calor latente de vaporização, considerado como constante (2,45 MJ kg⁻¹).

2.6. Eficiência do uso de água (EUA) na cultura da soja

A eficiência no uso da água é um parâmetro que relaciona a massa seca e a quantidade de água necessária para produzi-la, e foi obtida pela seguinte equação:

$$EUA = \frac{MS}{ET}$$

em que MS é massa seca acumulada (kg.ha⁻¹) e ET é a água consumida no período, correspondente a evapotranspiração real convertida para m³ ha⁻¹.

A eficiência do uso de água na cultura da soja não é um parâmetro do modelo CROPGRO-Soybean. Na prática ela pode ser calculada, dividindo a produção de massa seca (kg.ha⁻¹) pela quantidade de água evapotranspirada (mm), obtidas a partir das complexas rotinas do balanço de água no solo do modelo (RITCHIE, 1998; BOOTE et al., 1998).

A eficiência no uso da água para o rendimento econômico foi definida pela relação entre a produção de grãos e a água consumida durante todo o ciclo da cultura (ZHANG et al., 2004).

2.7. Análise estatística

Os testes utilizados na comparação das estimativas do modelo serão o coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1985), e de confiança (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), bem como o quadrado médio do erro (RMSE) de Loague e Green (1991), o desvio médio do erro (MBE) e o teste estatístico-t (Tabela 5).

Tabela 5 - Testes utilizados na comparação das estimativas do modelo

Teste	Equação
Coefficiente de correlação	$r_{Pi,Oi} = \frac{Cov(Pi,Oi)}{S_{Pi} \cdot S_{Oi}}$
Índice de concordância	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (P'i + O'i)^2} \right]$
Índice de confiança	$c = r * d$
Quadrado médio do erro	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{N}} + \frac{100}{M}$
Desvio médio do erro	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pi - Oi$
Teste-t	$t = \left[\frac{(N - 1) \cdot MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right]^{\frac{1}{2}}$

em que N é o número de observações, Pi é o valor estimado, Oi é o valor observado, P'i = Pi - M e O'i = Oi - M, sendo M a média da variável observada.

Os valores de coeficientes de correlação encontrados foram classificados seguindo a metodologia de Hopkins (2009) (Tabela 6).

Tabela 6 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação

Coeficiente de correlação “r”	Correlação
0,0 – 0,1	Muito baixa
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 0,9	Muito alta
0,9 – 1,0	Quase perfeita

O menor valor de RMSE deve ser desejado, uma vez que ele indica o melhor desempenho do modelo utilizado na estimativa. Baixos valores de MBE devem ser esperados, valores positivos indicam superestimativa no cálculo da variável e vice-versa.

O critério adotado para interpretar o desempenho das estimativas do modelo pelo índice “c” é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores dos coeficientes de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
< 0,30	Péssimo

Para determinar, através do teste-t, se o valor obtido pelo modelo é estatisticamente significativo, é necessário determinar um valor crítico de t que é obtido com uso de tabelas padrões. Os dados estimados pelo modelo serão julgados estatisticamente significantes para um determinado coeficiente de confiança, quando o “t” calculado for maior que o valor crítico de “t”.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Condições hídricas

Na Figura 5 está apresentada a precipitação pluvial diária acumulada e o conteúdo de água no solo durante o ciclo 2009/2010 da cultura da soja em Cruz Alta, RS. Pode se observar, que durante o ciclo houve dois períodos de stress hídrico de

diferentes magnitudes, ou seja, a falta de precipitação provocou decréscimos na umidade do solo nas camadas 0-20 cm e 20-50 cm de profundidade. O primeiro ocorreu entre os 72 (24/02/2010) e 94 (18/03/2010) dias após a semeadura. O segundo abrange o período entre o 101 (25/03/2010) e 126 (19/04/2010) dias após a semeadura, mas ambos foram de pequeno impacto sobre a produtividade.

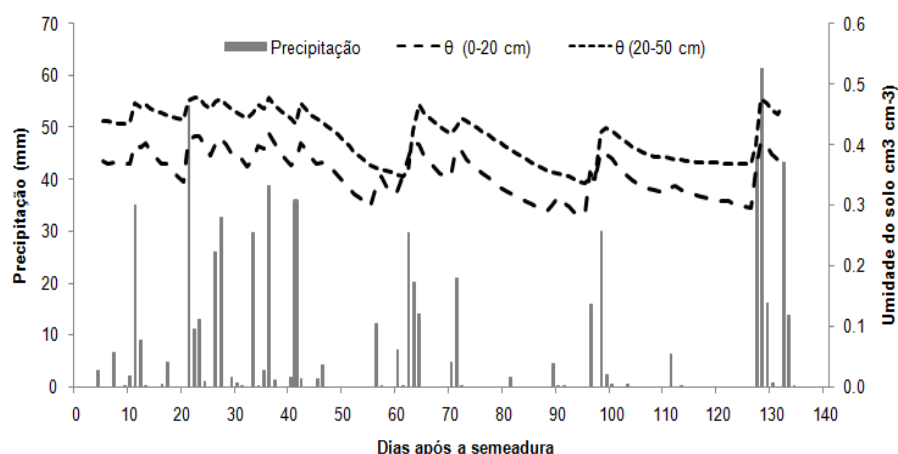


Figura 5 - Precipitação diária acumulada e conteúdo de água no solo para as camadas 0-20 cm e 20-50 cm de profundidade, durante o ciclo da cultura.

3.2. Biomassa seca e índice de área foliar

Na Figura 6 está apresentada a biomassa seca (MS) e o índice de área foliar (IAF) simulado pelo modelo e observado em campo, para Cruz Alta, RS, na safra 2009/2010. De acordo com o resultado, o modelo superestima a biomassa. Algumas discordâncias entre biomassa observada e simulada foram informadas por Martorano (2007) e Mercáu et al. (2007). As simulações do IAF pelo modelo acompanharam de perto as observações de campo durante a maior parte do ciclo de vida da soja. Porém, em termos quantitativos, o modelo tende a subestimar as observações. O modelo não previu bem a redução do IAF devido à senescência natural das folhas no período R6.

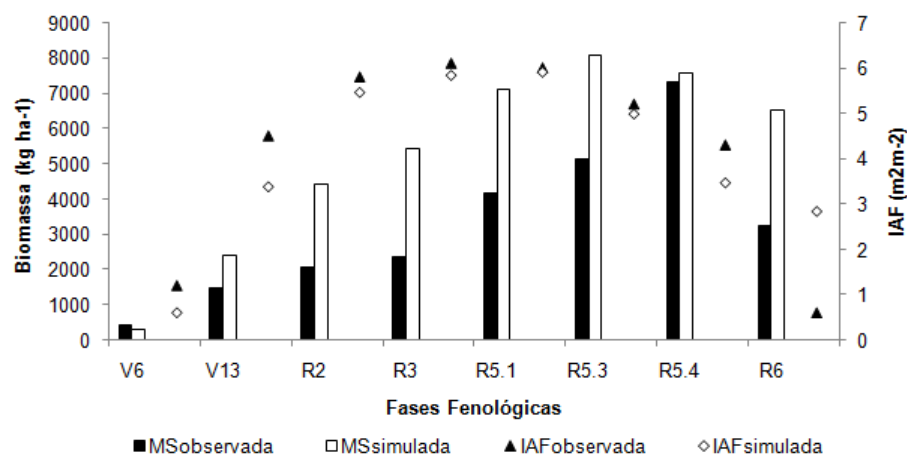


Figura 6 - Valores de biomassa seca e índice de área foliar simulado e observado durante o ciclo da cultivar Fundacep 53RR. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

3.3. Umidade do solo

Na Figura 7 estão ilustradas as médias diárias simuladas e observadas do conteúdo de água no solo ao longo do ciclo da soja na safra 2009/10. A evolução da umidade no solo em períodos de secagem do solo indica que o modelo apresentou o mesmo padrão de secagem na camada mais superficial do solo, todavia, nota-se um afastamento das linhas que indicam os valores simulados com os observados. Nas condições de campo, a umidade do solo na profundidade entre 0 e 0,20 m, variou de 0,28 a 0,42 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, com média diária de 0,35 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ao longo do ciclo da cultura. Nessa mesma profundidade, os valores médios simulados da umidade volumétrica do solo pelo modelo CROPGRO-Soybean foi de 0,30 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, variando entre 0,20 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ a 0,43 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Para a camada de 20 a 50 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, os valores observados da umidade solo oscilaram entre 0,34 e 0,48 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Esta variação foi maior nos dados simulados pelo CROPGRO-Soybean, com máximo de 0,42 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e mínimo de 0,18 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

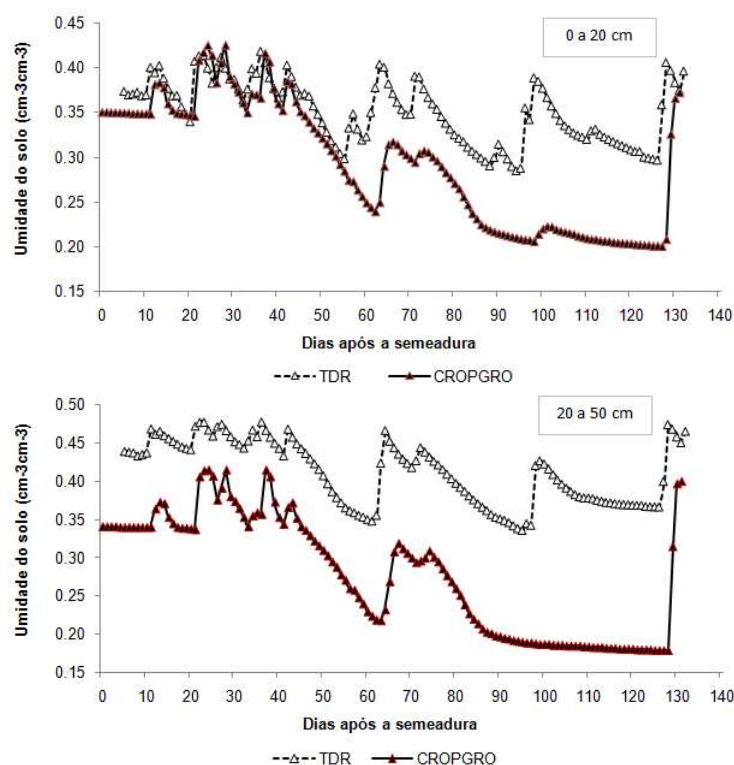


Figura 7 - Umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean e observada no campo pelo TDR (0-20 cm e 20-50 cm de profundidade), durante o ciclo da cultivar Fundacep 53RR. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

Na Figura 8 está apresentada a comparação entre os teores de umidade do solo observados no campo pelo TDR e simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean, nas camadas 0-20 e 20-50 centímetros. A relação encontrada indica um coeficiente de declividade da regressão linear de 0,55 e 0,67, para as camadas de 0-20 cm e 20-50 cm, respectivamente. As discrepâncias podem ser atribuídas a limitações na absorção e distribuição de água no solo simulado pelo modelo. Resultados obtidos por Meirelles et al. (2003) e Faria e Bowen (2003) apontam inexatidões do balanço de água no solo do modelo CROPGRO. Dallacort et al. (2010) observaram discrepâncias mais acentuadas no dia posterior a ocorrência da precipitação pluvial. Segundo Martorano (2007), a imprecisão nos valores simulados quanto aos estoques de água nas camadas mais superficiais, apontam para outras simulações discrepantes em se tratando de respostas da cultura a condição hídrica do solo.

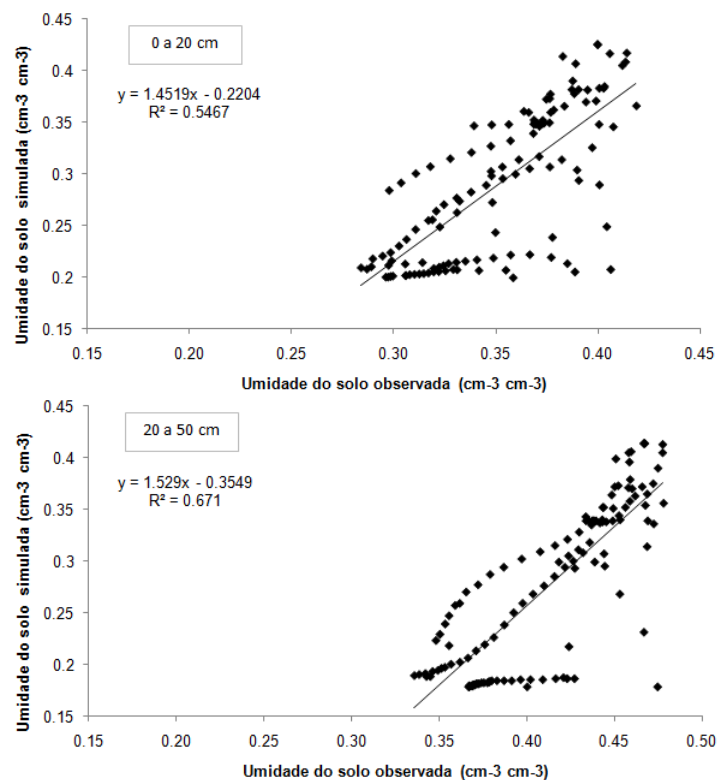


Figura 8 - Regressão linear entre a umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean e observada no campo pelo TDR (0-20 cm e 20-50 cm de profundidade), durante o ciclo da cultivar Fundacep 53RR. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

O resumo estatístico apresentado na Tabela 8 ilustra a baixa capacidade do modelo em reproduzir a umidade do solo na camada de 0 a 20 cm de profundidade, com índice de correlação “r”, de 0,74, de concordância de Willmott “d” de 0,43, e de confiança “c” de 0,31. Para a camada de 20 a 50 cm, os valores foram 0,82, 0,43 e 0,35 para os índices r, d e c, respectivamente.

Pode-se inferir, com base nos resultados que o modelo CROPGRO-Soybean apresentou baixa capacidade de predição da umidade volumétrica no solo, reforçando a necessidade de ajustes em rotinas ou sub-rotinas no modelo para melhorar as predições dos teores de umidade do solo em sistema plantio direto.

Tabela 8 - Resultados da análise estatística dos valores simulados de umidade do solo (0-20 cm e 20-50 cm de profundidade) com os obtidos pelo TDR, para o ciclo de desenvolvimento da cultura. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/10

Profundidade (cm)	mm d ⁻¹						t(calc)	t (5%)
	MBE	RMSE	r ²	r	d	c		
0 a 20	-0,06	0,11	0,55	0,74	0,43	0,31	7,58	2,06
20 a 50	-0,13	0,16	0,67	0,82	0,43	0,35	17,34	2,06

3.4. Evapotranspiração da soja

O desempenho do modelo foi avaliado pela comparação da evapotranspiração simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean, com medições micrometeorológicas do fluxo de calor latente pelo método da covariância dos vórtices turbulentos (Figura 9). Nota-se que a cultura da soja apresentou evapotranspiração máxima no período vegetativo, com pico máximo de 6,58 mm dia⁻¹ durante a fase V13, de índice de área foliar máximo. Já o modelo simulou um consumo máximo diário de água de 8 mm no início do período vegetativo, ou seja, contribuição significativa da evaporação na perda de água pela superfície do solo (Figura 10). Entretanto, a partir da evolução do índice de área foliar da cultura, o modelo passou a representar de forma satisfatória a evapotranspiração da soja, com valores próximos 6 milímetros por dia no período de máximo desenvolvimento da cultura. Suyker e Verma (2010) encontraram valores máximos de evapotranspiração da soja de 5,8 e 6,9 mm dia⁻¹ durante esse período, em condições de sequeiro e irrigado, respectivamente. Suyker e Verma (2008) obtiveram picos de ETc de 7,3 e de 6,5 mm para a soja com IAF máximo de 5,7 e 4,4, respectivamente. Na região amazônica, Souza (2010) encontrou pico máximo de 4,1 mm d⁻¹ durante o enchimento de grãos. No Rio Grande do Sul, Berlato e Bergamaschi (1979) obtiveram um consumo médio diário de 5,8 mm para a cultivar Bragg. Esse consumo, expresso pela evapotranspiração diária, variou desde 2,2 mm no subperíodo plantio-emergência, até o valor máximo de 7,4 mm, atingido no subperíodo compreendido entre o início do florescimento e o máximo surgimento de vagens.

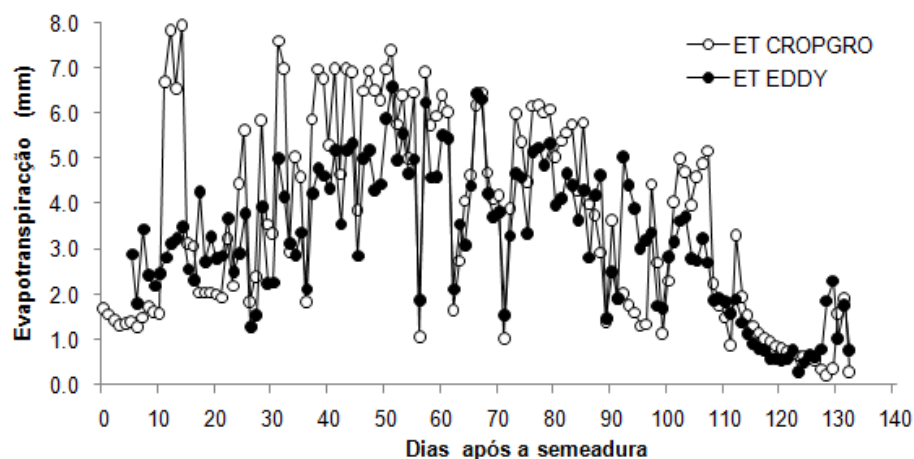


Figura 9 - Evapotranspiração diária da cultura da soja (Fundacep 53 RR), observada (ET EDDY) e simulada (ET CROPGRO). Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/10.

O comportamento sazonal da transpiração e evaporação do solo diária no CROPGRO-Soybean (Figura 10) indica que, no início do ciclo da cultura, os valores de evaporação foram às vezes superiores a 6 mm.dia^{-1} . Devido ao crescimento da área foliar, ou seja, no início da formação de legumes (R3) (Figura 2), percebe-se que a transpiração das plantas apresenta-se superior a evaporação no solo, atingindo valores de 6 mm.dia^{-1} .

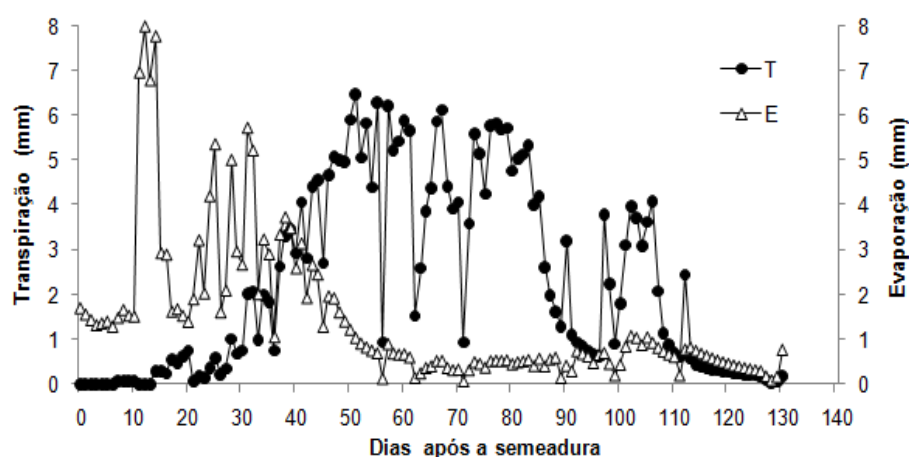


Figura 10 - Simulação da transpiração (T) da soja (Fundacep 53 RR) e evaporação (E) na superfície do solo, pelo modelo CROPGRO-Soybean. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/10.

O padrão da evapotranspiração acumulada simulada durante a estação de cultivo de soja correspondeu bem com os valores medidos (Figura 11), apesar de algumas divergências entre dados simulados que ocorreu no início e final da temporada de cultivo de soja. O modelo simulou razoavelmente a evapotranspiração total, com uma superestimativa de 13,1% em relação ao observado em campo. Esses dados são superiores aos encontrados por Dogan et al. (2007), que observaram uma diferença percentual entre os valores medidos e simulados de cerca de 5,30%. Resultados obtidos por Nielsen et al. (2002), utilizando o modelo de soja RZWQM, também constataram uma superestimação de 4,0% nos valores de evapotranspiração simulada. A comparação da evapotranspiração observados e simulados com o teste de regressão não indicou uma relação significativa entre os valores simulados para a soja (Figura 12). Estes resultados evidenciam a necessidade de ajustes em parâmetros do balanço de água no solo para considerar o sistema de plantio direto.

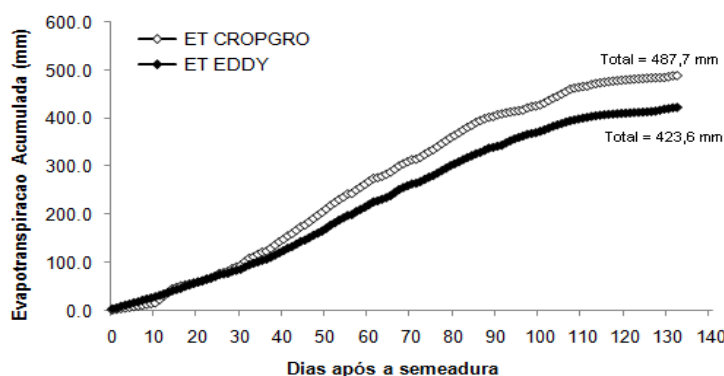


Figura 11 - Comparação entre o observado e o simulado do acumulo de evapotranspiração durante o ciclo da soja safra 2009/2010, Cruz Alta, RS.

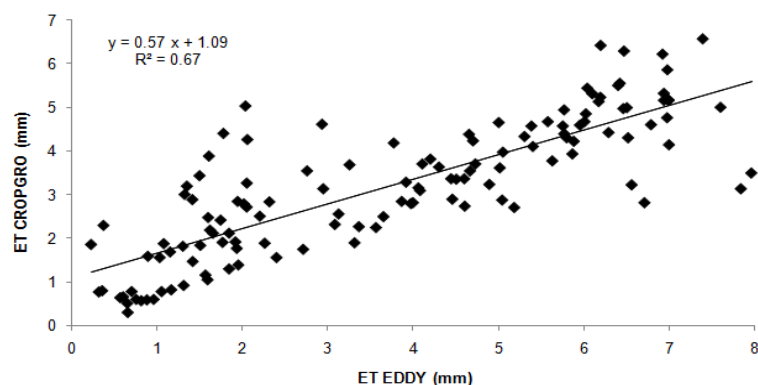


Figura 12 - Relação linear entre os valores observados e simulados da evapotranspiração diária durante o ciclo da soja safra 2009/2010, Cruz Alta, RS.

Ao comparar os resultados da evapotranspiração, simulada pelo CROPGRO-Soybean (Tabela 9) e as obtidas pelo método da covariância dos vórtices turbulentos, observa-se que ao final do ciclo, a evapotranspiração média foi de 0,3 mm.d⁻¹ superior aos valores observados em campo, equivalente a 3,7 mm.d⁻¹ de evapotranspiração simulada.

Tabela 9 - Valores médios de ETc diária e total para cada fase do ciclo da soja, obtidos em campo (EDDY) e simulados pelo modelo (CROPGRO)

Fases	EDDY		CROPGRO	
	ETc diária (mm.d ⁻¹)	ETc total (mm)	ETc diária (mm.d ⁻¹)	ETc total (mm)
S-V2	3,7 (± 0,79)	40,7	3,0 (± 0,69)	45,7
V2-V13	3,8 (± 0,22)	152,2	4,8 (± 0,34)	190,3
R1-R2	4,2 (± 0,57)	46,4	4,7 (± 0,84)	51,8
R3-R4	4,5 (± 0,37)	62,5	5,1 (± 0,43)	71,1
R5-R6	2,8 (± 0,22)	108,6	3,0 (± 0,29)	118,5
Maturação	0,9 (± 0,20)	13,2	0,7 (± 0,16)	10,4
Ciclo	3,3	423,6	3,7	487,7

S-V2 = emergência da soja a primeira folha completamente expandida; V2-V13 = primeira folha completamente expandida ao final do período vegetativo; R1-R2 = florescimento; R3-R4 = desenvolvimento da vagem; R5-R6 = desenvolvimento do grão; maturação fisiológica a colheita e ciclo da soja

A análise estatística do desempenho do modelo CROPGRO-Soybean em simular a evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura está apresentada na Tabela 10. Verificou-se um razoável desempenho do modelo em simular a evapotranspiração da soja, com índice de correlação “r” de 0,82, de concordância de Willmott “d” acima de 0,86 e de confiança de 0,71.

Tabela 10 - Resultados da análise estatística dos valores simulados de evapotranspiração da soja com os obtidos pela técnica de covariância dos vórtices turbulentos, para o ciclo de desenvolvimento da cultura. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/10

MBE	RMSE	mm d ⁻¹				t(calc)	t (5%)
		r ²	r	d	c		
-0.46	1,41	0,67	0,82	0,86	0,71	3,94	2,06

Em geral, o modelo CROPGRO-Soybean simulou a evapotranspiração de forma razoável ao longo do ciclo da cultura. Com exceção do início do ciclo, evidenciando a necessidade de melhorias neste processo durante as fases de fechamento incompleto do dossel vegetativo. O problema na representação do modelo, que é mais acentuado no início do ciclo da cultura, deve ser resultado da presença da camada de palha, formada por resíduos culturais, sobre a superfície em sistema de plantio direto, fazendo com que o modelo acabe evaporando mais em relação à indicativa dos dados observados.

3.5. Eficiência no uso da água

O total de matéria seca produzida (kg.ha⁻¹), evapotranspiração (m³.ha⁻¹), e os valores da eficiência do uso de água (kg.m⁻³) em cada fase do ciclo da soja, no observado em campo (Agrônomo) e simulado pelo modelo (CROPGRO), estão apresentados na Tabela 11. A eficiência do uso da água para o simulado foi máxima de 1,96 kg.m⁻³ na fase R5.1 e mínima de 0,35 na fase V6. As observações de campo da

eficiência do uso da água oscilaram entre 0,55 na fase V6 e 1,96 na fase R5.4. A EUA foram 0,4 kg.m⁻³ maiores com o modelo. Cabe ressaltar, que os valores de eficiência do uso da água encontrados para a cultura da soja estão de acordo com os observados por Costa et al. (1999) que encontraram valores variando de 0,43 kg. m⁻³ até 2,35 kg. m⁻³, respectivamente, para a fase vegetativa e após o florescimento. Procópio et al. (2002), verificaram que a eficiência do uso da água pela soja após o florescimento alcançou valor máximo de 2,088 kg.m⁻³.

Tabela 11 - Quantidade de matéria seca produzida (MS), evapotranspiração acumulada (ET) e a eficiência do uso da água (EUA) em cada fase do ciclo da soja, no observado e simulado. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010

Fase	Agrônômico			CROPGRO		
	MS (kg.ha ⁻¹)	ET (m ³ .ha ⁻¹)	EUA (kg.m ⁻³)	MS (kg.ha ⁻¹)	ET (m ³ .ha ⁻¹)	EUA (kg.m ⁻³)
V6	422	772	0,55	286	818	0,35
V13	1.459	1.777	0,82	2.400	2.188	1,10
R2	2.042	2.152	0,95	4.417	2.621	1,68
R3	2.357	2.457	0,96	5.435	2.939	1,85
R5.1	4.147	3.058	1,36	7.126	3.639	1,96
R5.3	5.125	3.578	1,43	8.077	4.138	1,95
R5.4	7.330	3.737	1,96	7.570	4.271	1,77
R6	3.239	4.029	0,80	6.521	4.660	1,40

Os resultados de uma maneira geral mostram que o modelo superestimou o uso eficiente da água em quase todas as fases do ciclo da soja analisadas, o que pode estar relacionado com os problemas relacionados a biomassa seca simulada ao longo do ciclo e principalmente a capacidade do modelo em reproduzir o consumo de água pela cultura em sistemas de plantio direto.

No entanto, quando foi calculada a eficiência de uso da água na cultura da soja, dividindo a produção de grãos pela quantidade de água consumida, durante seu ciclo de cultivo (Tabela 12). Verificou-se que o modelo é menos eficiente no uso da água para

simular aproximadamente a mesma produção de grãos de soja, para as condições, características do período e fatores considerados.

Tabela 12 - Evapotranspiração real, consumo de água, rendimento de grãos e eficiência no uso da água para o rendimento (EUAr), de plantas de soja

Parâmetros	Agrônômico	CROPGRO
Rendimento de grãos ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	2848	2838
Evapotranspiração real (mm)	423,6	487,7
Consumo de água ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	4236	4877
EUAr (rendimento de grãos) (kg m^{-3})	0,67	0,58

4. CONCLUSÃO

O modelo CROPGRO-Soybean apresentou baixa capacidade de predição da umidade volumétrica no solo em sistema plantio direto.

A evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura foi razoavelmente simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean, devido, possivelmente, aos efeitos da cobertura da superfície do solo pelos resíduos culturais, principalmente no início do ciclo de desenvolvimento da soja, decorrentes do sistema de plantio direto.

O modelo CROPGRO-Soybean superestimou a eficiência do uso da água da cultura da soja, para as condições, características do período e fatores considerados.

Ficou comprovado, com base nos resultados, a necessidade da incorporação dos efeitos da cobertura da superfície pelos resíduos culturais, decorrentes do manejo de plantio direto, nas estimativas do balanço de água no solo do modelo CROPGRO-Soybean.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 25-32.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque classe A e radiação solar global. **Agronomia Sulrigrandense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Eds.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: M. Dekker, 1998a. p. 651-691.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. p. 99-128.

BOOTE K.J.; JONES J.W.; BATCHELOR, W.D. et al. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: links to field performance and genomics. **Agronomic Journal**, v. 95, p. 32-51, 2003.

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.

COSTA, L.C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C.R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, Hoboken, v. 39, p. 91-97, 1999.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; FARIA, R.T. et al. Soil water balance simulated by CROPGRO-Drybean model for edaphoclimatic conditions in Maringá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 351-357, 2010.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Effect of seasonal water stress on soybean and site specific evaluation of CROPGRO-Soybean model under semi-arid climatic conditions. **Agric. Water Manage**, v. 90, p. 56-62, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FARIA, R.T.; BOWEN, W.T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, n. 4, p. 489-498, 2003.

GIACOMONI, M.H. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer**: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii, 2003.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

KUSS, R.C.R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. Santa Maria: UFSM, 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

MARTORANO, L.G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do Sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e Simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MAVROMATIS, T.; BOOTE, K.J.; JONES, J.W. et al. Repeatability of model genetic coefficients derived from soybean performance trails across different states. **Crop Sci.**, v. 42, p. 76–89, 2003.

MEIRELLES, E.L.; PEREIRA, A.P.; SENTELHAS, P.C. et al. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 163-171, 2003.

MERCAU, J.L.; DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.J. et al. Predicting on farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Res.**, v. 100, p. 200-209, 2007.

NEVES, L.O. **Fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente na cultura de caupi (*Vigna unguiculata* L.)**. 2006. 57 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NIELSEN, D.C.; MA, L.; AHUJA, L.R.; HOOGENBOOM, G. Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRC models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 6, p. 1234-1243, 2002.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PROCÓPIO, S.O. et al. Análise do crescimento e eficiência no uso da água pelas culturas de soja e feijão e por plantas daninhas. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1345-1351, 2002.

REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO DO RS E SC – ROLAS. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CMPT, 1998. 223 p.

RITCHIE, J.T. A user orientated model of the soil water balance in wheat. In: FRY, E.; ATKIN, T.K. (Ed.). **Wheat growth and modeling**. New York: NATO-ASI Ser., 1985. p. 293-305.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and water stress. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Ed.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. p. 41-54.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da Produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2005. 216 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

SAITO, M.; MIYATA, A.; NAGAI, H.; YAMADA, T. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, p. 93-109, 2005.

SAN JOSÉ, J.J. et al. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour, and energy fluxes in pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Red Spanish] field using eddy covariance. **Photosynthetica**, v. 45, p. 370-384, 2007.

SOUZA, P.J.O.P. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia: impactos no balanço de energia e simulação do crescimento e rendimento da soja**. 2010. 284 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

STONE, F.L.; SILVEIRA, P.M.; MOREIRA, J.A.A.; BRAZ, A.J.B.P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agric. For. Meteorol.**, v. 148, p. 417-427, 2008.

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.

ZHANG, Y.; ELOISE, K.; QIANG, Y. et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 64, p. 107-122, 2004.

CAPÍTULO 4

ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DE USO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA PELO MODELO CROPGRO-SOYBEAN

Resumo: O objetivo no presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean, parte integrante do DSSAT, na estimativa da radiação fotossinteticamente ativa ao longo do ciclo da soja. Para avaliação da estimativa do modelo foram utilizados dados de experimento de campo conduzidos pela Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) em Cruz Alta, Estado do Rio Grande do Sul - Brasil (28°36'S, 53°40'W e altitude 409 m), durante o período de 14/12/2009 a 28/04/2010. De acordo com os resultados obtidos, o modelo CROPGRO-Soybean simulou de modo bastante satisfatório a eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura da soja, principalmente, para rendimento econômico (grãos), mas demonstrou limitações nas estimativas de biomassa, IAF, em particular em algumas fases de desenvolvimento, indicando necessidade de incorporação de melhorias nas estimativas desses parâmetros para obtenção de maior acurácia por parte do modelo na da simulação do crescimento da dessa cultura.

Palavras-chave: DSSAT, índice de área foliar, radiação fotossinteticamente ativa, rendimento de grãos, soja.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura de grande importância econômica na agricultura Brasileira, fazendo-se necessário a busca de conhecimentos sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura e de suas limitações, principalmente quanto à radiação solar. A disponibilidade de radiação solar é um dos fatores que mais limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas. Toda energia necessária para a

realização da fotossíntese, processo que transforma o CO₂ atmosférico em energia metabólica, é proveniente da radiação solar (TAIZ; ZIEGER, 2004).

A radiação, que compreende os comprimentos de onda entre 400 nm e 700 nm, radiação visível, é a fonte primária de energia na fotossíntese, chamada radiação fotossinteticamente ativa incidente (TAIZ; ZIEGER, 2006). A relação entre a formação de matéria seca e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada tem sido amplamente usada para definir a eficiência do uso da radiação pelas culturas (SIVAKUMAR; VIRMANI, 1984; COSTA et al., 1996).

A eficiência do uso da radiação (EUR) é a relação entre a energia solar captada pela cultura e sua taxa de produção de biomassa (MONTEITH, 1994). Tal relação é definida como a eficiência com que a radiação capturada é usada para produzir novo material (BLACK; ONG, 2000), e tem sido utilizado com sucesso como ferramenta para simular o crescimento de diferentes culturas (ALBRIZIO; STEDUTO, 2005).

Alguns autores observaram variação na EUR ao longo do ciclo da soja, encontrando valores em torno de 1,8 g MJ⁻¹.m⁻² de PAR interceptada (CONFALONE et al., 1997). O valor de EUR médio para soja, determinado por Souza et al. (2009), foi de 2,13 g.MJ⁻¹.PAR, considerando dados até os 96 DAS, quando se observa certa não linearidade próxima da maturação. Outros resultados de literatura apresentam valores de EUR para a soja, sob condições de campo, sem restrição hídrica, variando de 2,28 g.MJ⁻¹, antes do florescimento, para 2,53 g.MJ⁻¹, após o florescimento, baseados, em estimativas de radiação interceptada em função de medidas quinzenais de radiação PAR (SANTOS et al., 2003).

No entanto, poucos artigos científicos relatam a variação da eficiência de uso da radiação solar, durante o desenvolvimento de novas cultivares sempre adaptadas aos diferentes sistemas de cultivo, para fins de uso em modelos de simulação acerca do crescimento, desenvolvimento e rendimento da soja.

Com o presentes trabalho objetivou-se avaliar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean em simular a eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa em diferentes fases fenológicas de uma cultivar de soja na região de Cruz Alta, RS.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo e do modelo CROPGRO-Soybean

O estudo foi desenvolvido em experimento conduzido na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP). A Fundacep localiza-se no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, à latitude de 28°36'Sul, longitude de 53°40'Oeste e altitude média de 409 metros (Figura 1).



Figura 1 - Localização do sítio experimental no Estado do Rio Grande do Sul.

As simulações foram realizadas, utilizando-se o modelo CROPGRO-Soybean (*Crop-Environment Resource Synthesis*) (BOOTE et al., 1998a, 1998b e 2003), versão 4.0.2.0, pertencente ao sistema DSSAT, que simula crescimento, desenvolvimento e produtividade da soja (HOOGENBOOM et al., 2003). O modelo permite as simulações para as condições específicas de cada solo, dos principais processos físicos e fisiológicos da cultura, tais como fotossíntese, respiração, acumulação e partição da matéria seca, fenologia, crescimento foliar de caules e de raízes, extração de água do solo, e evapotranspiração e produção da soja, em reposta à variação dos dados, climatológicos diários, de precipitação pluvial, radiação solar global, temperaturas máxima e mínima do ar, os quais foram fornecidos ao modelo como dados de entrada. Também foram utilizados parâmetros de água no solo para avaliar o suprimento de água

pela planta. A sensibilidade do modelo varia com a cultivar, a data de plantio, o manejo entre plantas e o manejo de irrigação.

2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean

A calibração do modelo CROPGRO-Soybean para as condições experimentais deste trabalho foram efetuados a partir do ajuste nos coeficientes genéticos que caracterizam aspectos importantes da cultura, conforme recomendação de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003).

Para calibração dos coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean foram utilizados os dados da cultivar de ciclo precoce (FUNDACEP 53RR), semeada em 14/12/2009, com espaçamento de 0,40 m entre linhas, e população de 300 mil plantas ha⁻¹ em sistema de plantio direto.

O conjunto de informações fenológicas necessárias para a calibração dos coeficientes genéticos foi: florescimento, início da formação da vargem e enchimento de grão e, maturação fisiológica, índice de área foliar máximo e rendimento de grãos da cultura (kg.ha⁻¹) obtidos no experimento de campo realizado pela Fundacep, Cruz Alta, RS (Tabela 1).

Tabela 1 - Duração do período semeadura - florescimento (dias), semeadura - início da formação de grão, semeadura - início da formação da vargem semeadura - maturação fisiológica (dias), índice de área foliar máximo (m²m²) e rendimento da cultura (Kg ha⁻¹), para a cultivar Fundacep 53RR

Parâmetros da cultura	FUNDACEP 53RR
Florescimento (dias)	56
Formação da vargem (dias)	67
Enchimento de grão (dias)	81
Maturação fisiológica (dias)	120
Índice de área foliar máximo (m ² m ²)	6.1
Rendimento de grãos (kg.ha ⁻¹)	2848

O conjunto das variáveis meteorológicas de entrada, utilizado pelo modelo, foi coletado de uma estação meteorológica automática (EMA) montada em uma torre micrometeorológica de três metros de altura acima da cultura da soja (Figura 1). A Tabela 2 apresenta as variáveis meteorológicas mensais durante o ciclo da soja na safra de 2009/2010. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico – LVd3 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2006), com as características físico-hídricas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2 - Médias meteorológicas mensais durante o ciclo da soja na safra de 2009/2010

Meses	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Rg (MJ.m ⁻²)	UR (%)	V (m.s ⁻¹)	Prec. (mm)
Dezembro	32,27	20,16	26,17	73,77	3,7	105,4
Janeiro	29,08	18,86	21,51	80,95	3,0	258,2
Fevereiro	29,95	19,59	22,38	80,37	2,8	109,2
Março	28,85	17,05	20,56	77,94	3,0	55,4
Abril	25,63	13,80	14,65	72,54	3,3	186,2

Tmax = temperatura máxima do ar; Tmin = temperatura mínima do ar; UR = umidade relativa; v = velocidade do vento; Rg = radiação solar global; Prec = chuva.

Durante o experimento, além das variáveis meteorológicas de entrada do modelo, foi monitorada, também, a radiação fotossinteticamente ativa incidente RFA (Wm⁻²), com o uso de sensor quântico (modelo Kipp e Zonen - PAR LITE) medida a 1 metro acima da superfície, sob a cultura (Figura 2).



Figura 2 - Estação meteorológica automática (EMA) instalada acima da cultura da soja.

Tabela 3 - Características físico-hídricas do solo encontrado no local de estudo

Profundidade (cm)	DG (g.cm ⁻³)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)	Fração do solo (%)		
				Areia	Silte	Argila
5	2,50	0,35	0,17	28,57	39,46	31,95
12	2,48	0,34	0,17	27,50	41,34	31,15
60	2,46	0,37	0,22	24,69	46,79	28,505

DG = densidade global; CC = capacidade de campo e PMP = ponto de murcha permanente.

A correção do solo e a adubação da área experimental foram feitas por meio de análise do solo em concordância com as recomendações de Rolas (1998). Ou seja, utilizando-se 350 kg da formulação 0-20-20 por ha na semeadura. O cultivo antecedente foi de aveia. A área foi dessecada aplicando o herbicida glifosato. Foi realizado o controle das plantas invasoras remanescentes, quando necessário, com a aplicação do mesmo herbicida. O controle de doenças e pragas foi realizado de acordo com as práticas culturais recomendadas para o cultivo da soja, garantindo que o experimento ocorresse com a mínima interferência desses fatores.

Com os coeficientes genéticos ajustados da cultivar FUNDACEP 53RR (Tabela 4), realizou-se a simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura da soja para a região estudada.

Tabela 4 - Coeficientes genéticos da cultivar Fundacep 53RR calibrados no CROPGRO-Soybean, em Cruz Alta, RS, 2009/10

Cultivar	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF
FUNDACEP 53RR	12.83	0.303	33	7.5	18	42	18
LFMAX	SLAVAR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
1.03	355	170	1	0.15	13	2.05	8

em que CSDL, também definida como CSDVAR, representa o comprimento crítico do dia, acima do qual o processo de desenvolvimento reprodutivo não é afetado (horas); PPSN, inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para fotoperíodo com o tempo (1/hora); EM-FL, período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (R1) (dias fototermais); FL-SH, período entre o aparecimento da primeira flor e a primeira vagem (R3) (dias fototermais); FL-SD, período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação da semente (R5) (dias fototermais); SD-PM, período entre o início da formação da semente e a maturidade fisiológica (R7) (dias fototermais); FL-LF, período entre o aparecimento da primeira flor (R1) e final da expansão foliar (dias fototermais); LFMAX, taxa máxima de fotossíntese da folha a taxa ótima de temperatura 30°C; SLAVARN, área foliar específica sob condições padrão de crescimento; SIZLF, tamanho máximo da folha completamente expandida (cm²); XFRT, máxima fração do crescimento diário que é particionada para a semente mais a vagem; WTPSD, peso máximo por semente (g); SFDUR, duração do período de enchimento das sementes nas vagens, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); SDPDV, média de sementes por vagem, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); PODUR, tempo necessário para a cultivar alcançar condições ideais de vagens (dias fototermais).

2.3. Eficiência no uso da radiação

O cálculo da eficiência do uso da radiação (EUR) foi realizado com base na relação entre a massa seca da parte aérea (MS, g.m⁻².d⁻¹) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{int}, MJ.m⁻².d⁻¹), acumuladas até a data da amostragem correspondente a cada estágio fenológico estudado, em que a EUR se refere à eficiência no uso da radiação da cultura em g.MJ⁻¹ de matéria seca, conforme a equação abaixo:

$$EUR = \frac{MS}{RFA_{int}}$$

A EUR, para todo ciclo, foi estimada por meio da regressão linear (forçada a passar pela origem), entre MS e RFA_{int}, até o estágio fenológico de pleno enchimento de grão (R6).

A radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m⁻².d⁻¹) pela soja ao longo do dia foi obtida pela diferença entre a RFA incidente (RFA_{inc}) e a RFA transmitida (RFA_{trans}) ao longo do dossel, conforme Sinclair e Muchow (1999):

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_{trans}$$

A radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFA_{trans}) pela soja, para cada dia, foi determinada pela expressão abaixo:

$$RFA_{trans} = RFA_{inc} \cdot \exp^{-k \cdot IAF}$$

No presente estudo, foi utilizado o valor de 0,72 como coeficiente específico de extinção de luz (k , m^2 de folha por m^2 de solo), que representa a média dos valores encontrados na literatura (SCHÖEFFEL; VOLPE, 2001; PEREIRA, 2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Condições meteorológicas durante o experimento

Na Figura 3 está ilustrada a variação da temperatura máxima e mínima do ar, da radiação solar global e da precipitação ao longo de todos os estádios da cultura no período experimental. As condições de tempo para a safra agrícola 2009/2010 foram favoráveis para o desenvolvimento da cultura da soja, com precipitações frequentes e temperaturas do ar apropriadas que permitiram obter um rendimento de grãos elevado (aproximadamente 48 sacas por hectare). A precipitação pluvial durante o ciclo da soja foi de 650 mm. Para o Rio Grande do Sul, Berlato et al. (1986) encontraram valor médio de consumo de água de 827mm para todo ciclo da cultura da soja. Cabe ressaltar que durante o período vegetativo da cultura choveu em torno de 316 mm. Entretanto, de R3 a R5 foram computados 28 mm, sendo que a maior contribuição hídrica à área experimental foi de 21,0 mm, em 23/03/2010, e os demais milímetros restantes (7 mm) ocorreram na forma de chuvas esparsas com reduzida quantidade pluvial. Destaca-se que, de acordo com Matzenauer et al. (2003), o período entre R1 e R5 é considerado crítico para a soja quanto à oferta hídrica.

O total acumulado de radiação solar global (R_g), no período compreendido entre a semeadura e a maturação fisiológica da cultura da soja foi de 2.498 MJ.m^{-2} , com valor médio de $21,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, e uma variação de $34,1$ a $4,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. A temperatura do ar apresentou tendência de decréscimo até o final do ciclo da cultura, sendo que a média foi de $23,4^\circ\text{C}$, com médias das temperaturas extremas de $17,8^\circ\text{C}$ e $28,9^\circ\text{C}$ para as mínimas e máximas, respectivamente. As temperaturas máximas do ar

ficaram abaixo de 35°C e as mínimas foram predominantemente superiores a 10°C, ou seja, a cultura se manteve na faixa dos limites térmicos favoráveis durante o seu ciclo. Os dados corroboram com as afirmações de Berlato (1992) e Barni (1999) que citam que o regime térmico não apresenta limitações à cultura da soja no Rio Grande do Sul.

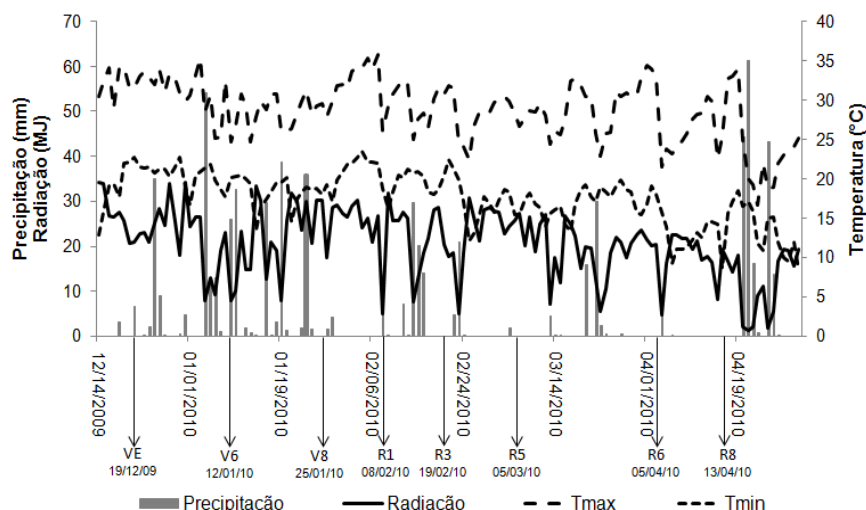


Figura 3 - Dados meteorológicos observados durante o ciclo da cultivar FUNDACEP 53RR para o ano de 2009/2010.

3.2. Radiação global e radiação fotossinteticamente ativa

Pode ser observado na Figura 4, que a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) total, durante o ciclo da soja, foi de 1.150 MJ.m⁻², com média de 8,8 MJ.m⁻².dia⁻¹ com valores extremos variando entre 0,5 e 14,5 MJ.m⁻².dia⁻¹. A resposta do modelo à radiação fotossinteticamente ativa total foi de 1.205 MJ.m⁻², sendo a média de 9,2 MJ.m⁻².dia⁻¹ com valores extremos variando entre 0,5 e 15,0 MJ.m⁻².dia⁻¹.

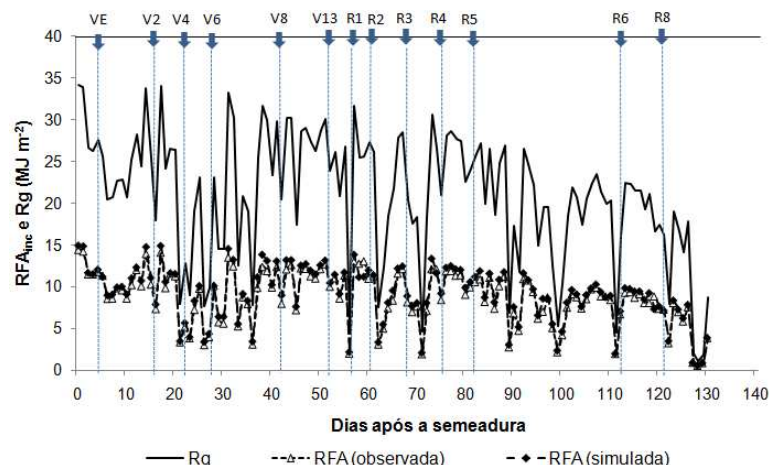


Figura 4 - Radiação solar global incidente (R_g) e radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA_{int}) observada e simulada no período compreendido entre a semeadura e a colheita da soja. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

Na Figura 5 apresenta a razão entre a RFA e a R_g e a equação de estimativa e o respectivo coeficiente de determinação (r^2), obtidos a partir de dados instantâneos de radiação que foram integrados ao longo de cada dia, e os simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean. Os valores de RFA/R_g se referem ao período compreendido entre a semeadura e a colheita da soja. Os dados de campo apontaram que a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi cerca de 42% da radiação solar global (R_g). Quanto ao modelo, verifica-se que a RFA foi aproximadamente constante, ou seja, 44% da R_g durante todo o ciclo da soja (Figuras 5 e 6). Segundo Martorano (2007), em experimento com a cultura da soja, na região de Eldorado do Sul, RS, foi encontrada a razão média de 42% entre a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e da radiação solar global (R_g). Esta razão média também foi encontrada por Franca et al. (1999), no mesmo local ($0,42 \pm 0,02 \text{ mol.mol}^{-1}$), em experimento com a cultura do milho.

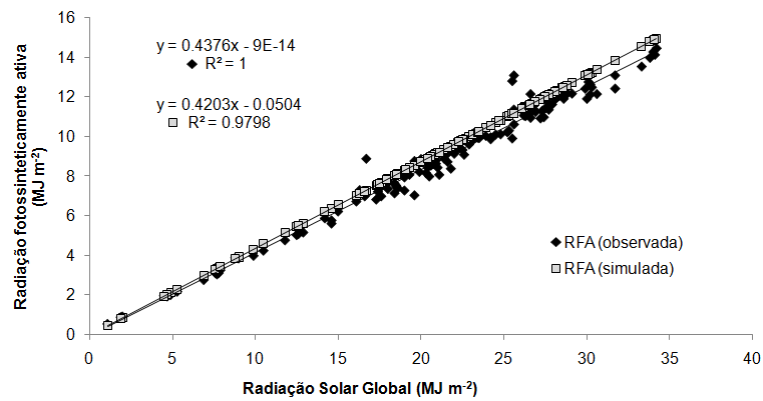


Figura 5 - Relação entre os valores diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e da radiação global (Rg) medidos e simulados, no período compreendido entre a semeadura e a colheita da soja. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/10.

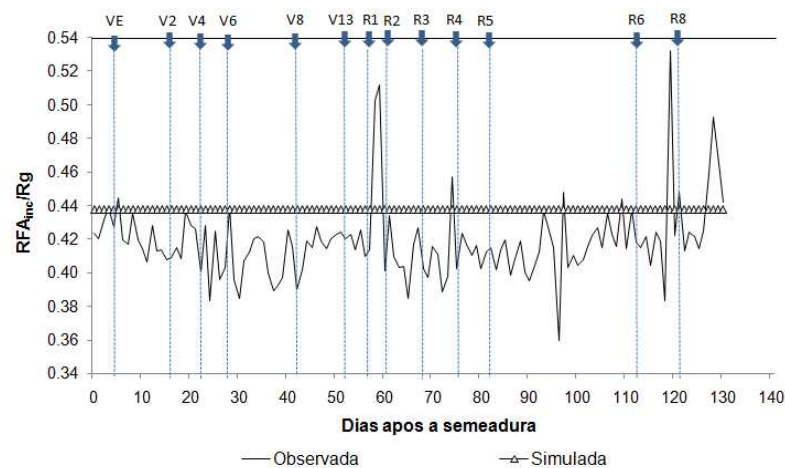


Figura 6 - Variação diária da razão RFA_{int}/Rg medida em campo e simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean ao longo do ciclo. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/10.

Na Figura 7 são mostrados os valores medidos e simulados da RFA. Nota-se, que as estimativas de RFA obtidas a partir do modelo CROPGRO-Soybean superestimaram os valores reais de RFA medidos pelo sensor quântico. Este resultado pode ser explicado pelo efeito da inclusão de valores mais elevados da RFA/Rg durante o ciclo da cultura pelo modelo. Entretanto, é importante considerar que a diferença entre

os valores simulados e os observados foi baixa, sugerindo a aplicabilidade do modelo em estimativas de RFA.

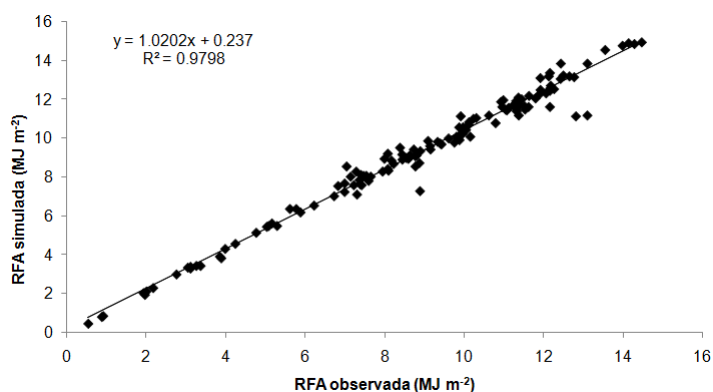


Figura 7 - Validação das estimativas da RFA efetuadas pelo modelo CROPGRO-Soybean durante o ciclo da soja. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

3.3. Radiação fotossinteticamente ativa interceptada

A interceptação de radiação solar é uma função do índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de extinção luminosa (k) (PENGELLY et al., 1999). Na Figura 8 pode ser verificado que no início do desenvolvimento da cultura, RFAint é baixa. Portanto, nessa fase de desenvolvimento (até 28 dias), a cultura ainda não utiliza totalmente a radiação solar disponível. Para condições de campo, a máxima RFA interceptada foi de $12,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, atingida na fase (R1) e a RFA interceptada simulada atingiu valores máximos na fase R3, equivalente a $13,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Com relação ao declínio na interceptação da radiação, o mesmo ocorre com a senescência das folhas (R6) em condições de campo. Pelo modelo CROPGRO-Soybean a simulação do declínio teve início aos 120 dias, devido ao fato da superestimativa do índice de área foliar ao final do ciclo da cultura.

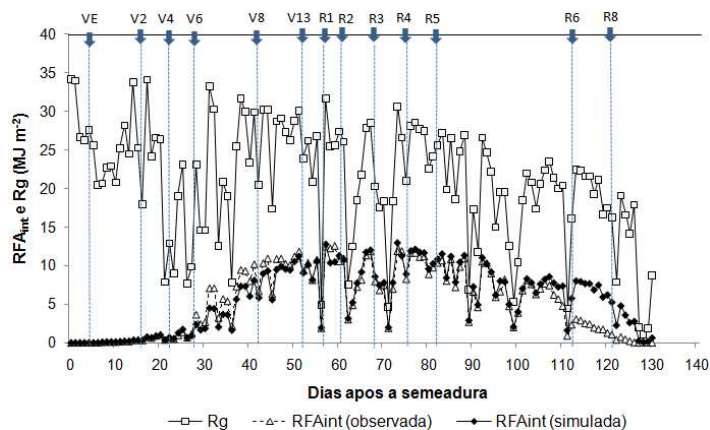


Figura 8 - Radiação global média diária (R_g , MJ.m-2.dia-1) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, MJ.m-2.dia-1) observada e simulada, para a localidade de Cruz Alta, RS, durante o ciclo da soja, safra 2009/2010.

Na Figura 9 estão apresentadas as frações de interceptação da radiação ao longo do ciclo da soja, observada e simulada. Para condições de campo, a soja atingiu interceptação de 97% de radiação PAR, entre 63 a 89 dias após a semeadura e, aproximadamente, entre 67 a 87 dias, na simulada pelo modelo. Resultados com comportamento semelhante foram obtidos por Souza et al. (2009) na região Amazônica, com máxima interceptação de radiação (99%) acontecendo entre 70 e 96 dias após a semeadura. Costa et al. (1999) encontraram valores de máxima interceptação de radiação (99%) ocorrendo entre 70 e 96 dias após a semeadura, para soja cultivada sob diferentes condições de irrigação, durante todo o ciclo, na região Sudeste do Brasil.

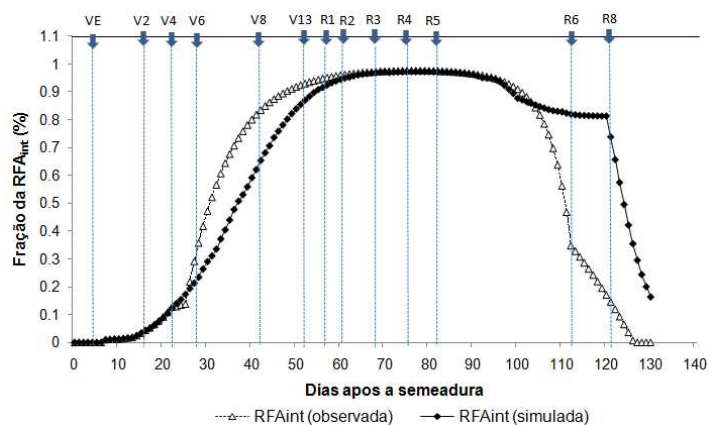


Figura 9 - Fração de interceptação da radiação PAR ao longo do ciclo da soja. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

3.4. Biomassa seca e índice de área foliar

A área foliar, que constitui parte do mecanismo de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, tem grande relevância na síntese e acúmulo de matéria seca pelos vegetais. Na Figura 10 está representada a biomassa seca (MS) e o índice de área foliar (IAF) simulado pelo modelo e observado em campo, para Cruz Alta, RS, na safra 2009/2010. De acordo com o resultado obtido, o modelo superestima a biomassa. Algumas discordâncias entre biomassa observada e simulada foram informadas por Martorano (2007) e Mercau et al. (2007). As simulações do IAF pelo modelo foram semelhantes ao que ocorreu em condições de campo durante a maior parte do ciclo de vida da soja. Porém, em termos quantitativos, o modelo tende a subestimar as observações. Destaca-se que o modelo não simulou adequadamente a redução do IAF devido, provavelmente, à senescência natural das folhas no período R6. Os resultados de matéria seca aérea e IAF evidenciam que o modelo apresentou limitações na estimativa da produção de biomassa aérea pela cultura, sendo necessários ajustes capazes de melhorar seu desempenho.

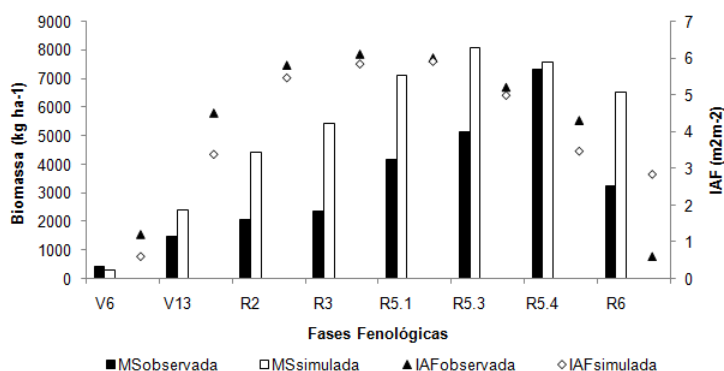


Figura 10 - Valores de biomassa seca e índice de área foliar simulado e observado durante o ciclo da cultivar Fundacep 53RR. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/2010.

Ainda com base na Figura 3, é observada a tendência de superestimativa da biomassa durante boa parte do ciclo da cultura. Tal fato pode ser justificado, possivelmente, por algum outro tipo de estresse que a cultura possa ter experimentado

ao longo de seu ciclo, o qual não foi identificado e, conseqüentemente, não simulado pelo modelo.

3.5. Eficiência no uso da radiação

A eficiência no uso da radiação (EUR) é um indicador da habilidade com que o dossel vegetativo absorve e utiliza a radiação para a síntese de matéria seca. Na Figura 11 são apresentados os valores das declividades das retas de regressões lineares que relacionam a produção de matéria seca com quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, necessária para a sua produção. A eficiência de uso da RFA pela soja, no experimento realizado em Cruz Alta, RS, foi em torno de 1,06 g de matéria seca (MS).MJ⁻¹(RFA_{int}). Na condição simulada, o valor da eficiência do uso da radiação RFA, foi de 1,32 MS.MJ⁻¹ de RFA incidente, considerando dados até a fase de desenvolvimento R5.4. Esses valores estão próximos aos encontrados por Confalone e Navarro (1999), que variaram de 0.97 a 1.92 g.MJ⁻¹. Outros autores encontraram valores de EUR que variaram entre 0,90 g.MJ⁻¹ a 2,67 g.MJ⁻¹ (NAKASEKO; GOTOH, 1983; MUCHOW et al., 1993) em culturas sem estresse hídrico. Os pesquisadores Schoffell e Volpe (2001) encontraram, para diferentes cultivares de soja na região Sudeste do Brasil, o valor médio de 1,23 g.MJ⁻¹, entretanto, estudos realizados por Souza et al. (2009) e Santos et al. (2003) apresentaram valores superiores aos encontrados no presente estudo. Essas diferenças podem ser atribuídas, possivelmente, a diferenças na densidade da população de plantas, cultivares, bem como ao modo pelos quais foram tomados os valores de matéria seca (total ou aérea) e a RFA (interceptada, absorvida ou incidente).

O total de matéria seca produzida (kg.ha⁻¹), radiação fotossinteticamente ativa (MJ.m⁻²), e os valores da eficiência do uso de radiação (kg.MJ⁻¹) em cada fase do ciclo da soja, observado em campo (Observado) e simulado pelo modelo (CROPGRO), estão apresentados na Tabela 5. Pode ser observado que durante as fases fenológicas V13 a R5.3, ocorreram diferenças significativas entre os valores calculados agronomicamente e modelados, decorrentes da superestimativa da biomassa com o comprometimento da eficiência no uso da radiação nestes estádios pelo modelo.

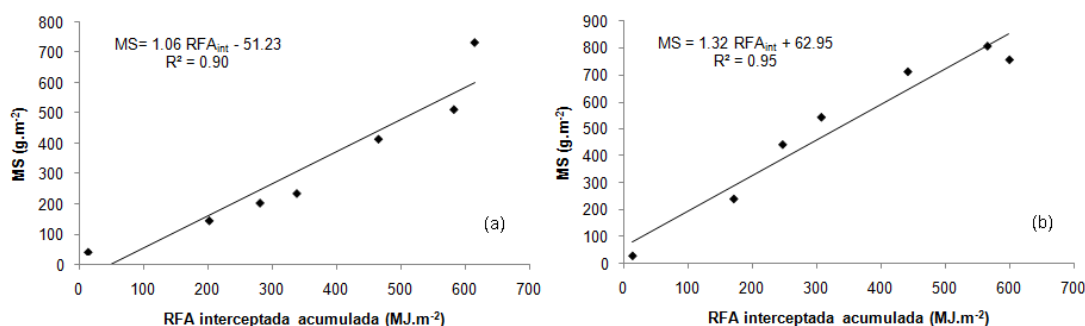


Figura 11 - Relação entre a produção de massa seca acumulada total (MS, g m⁻²) da soja e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (RFA_{int}, MJ m⁻²) durante o ciclo da soja, observada (a) e simulada (b).

Tabela 5 - Quantidade de matéria seca produzida (MS), radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (RFA_{int}) e a eficiência do uso da radiação (EUR) em cada fase do ciclo da soja, no observado e simulado. Rede Sulflux, Cruz Alta, RS, safra 2009/10

Fase	Observado			CROPGRO		
	MS (g m ⁻²)	RFA (MJ m ⁻²)	EUR (kg m ⁻³)	MS (g m ⁻²)	RFA (MJ m ⁻²)	EUR (g MJ ⁻²)
V6	42,2	14,6	2,89	28,6	13,9	2,05
V13	145,9	202,8	0,72	240,0	171,1	1,40
R2	204,2	281,6	0,72	441,7	247,0	1,79
R3	235,7	338,8	0,70	543,5	307,0	1,77
R5.1	414,7	465,8	0,89	712,6	441,4	1,61
R5.3	512,5	583,0	0,88	807,7	565,0	1,43
R5.4	733,0	615,2	1,19	757,0	599,1	1,26
R6	323,9	678,9	0,48	652,1	676,0	0,96

Entretanto, quando se observa a eficiência no uso da radiação para rendimento econômico, EUAr (Tabela 6), verifica-se que os valores obtidos em campo (Agrônomo) e os simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean foram similares, equivalendo a 4,6 kg.MJ⁻¹ e 4,7 kg.MJ⁻¹, respectivamente.

Tabela 6 - Radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada acumulada, RFA_{int} , ($MJ\ m^{-2}$), produção de massa seca acumulada total (MS, $g\ m^{-2}$), rendimento de grãos ($kg\ ha^{-1}$), eficiência no uso da radiação, EUR, ($g\ MJ^{-1}$) para a matéria seca total e eficiência no uso da radiação ($kg\ MJ^{-1}$) para o rendimento EURr, de plantas de soja, em Cruz Alta, RS

Parâmetros	Agrônomo	CROPGRO
RFA_{int}	615	599
MS (fase R5.4)	733	757
Rendimento de grãos	2.848	2.838
EUR (massa seca total)	1,2	1,3
EURr (rendimento de grãos)	4,6	4,7

Em geral, os resultados evidenciam que o modelo superestimou a eficiência do uso da radiação em quase todas as fases do ciclo da soja analisadas, o que pode estar relacionado, possivelmente, com a baixa capacidade do modelo em simular a biomassa seca da cultivar analisada. Entretanto, não houve diferenças entre a eficiência no uso da radiação para rendimento econômico observado e simulado, evidenciando a boa qualidade do modelo em simular a radiação fotossinteticamente ativa acumulada e rendimento de grãos ao final do ciclo da soja, quando adequadamente calibrado.

4. CONCLUSÃO

O modelo CROPGRO-Soybean apresentou satisfatória capacidade de predição da radiação fotossinteticamente ativa incidente e rendimento de grãos, para as condições, características do período e fatores considerados. Os valores da eficiência no uso da radiação também estiveram de acordo com a maioria dos valores obtidos em literatura.

Há necessidade de se incorporar melhorias nas estimativas de biomassa durante o ciclo desenvolvimento e no índice de área foliar ao final do ciclo da cultura no modelo CROPGRO-Soybean para as cultivares brasileiras de soja adaptadas aos novos sistemas de cultivo.

Alguns parâmetros devem ser otimizados utilizando a estimativa de incerteza generalizada de verossimilhança, para maior precisão do modelo em simular o crescimento da cultura da soja.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRIZIO, R.; STEDUTO, P. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, p. 254-268, 2005.

BARNI, N.A. Práticas agrícolas para minorar o impacto das secas e racionalizar a irrigação. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1999. p. 116-125.

BERLATO, M.A. Condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 11-24.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque classe A e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BLACK, C.; ONG, C. Utilisation of light and water in tropical agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 104, p. 25-47, 2000.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: M. Dekker, 1998a. p. 651-691.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. p. 99-128.

BOOTE K.J.; JONES J.W.; BATCHELOR, W.D. et al. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: links to field performance and genomics. **Agronomic Journal**, v. 95, p. 32-51, 2003.

CONFALONE, A.E.; NAVARRO, M.D. Influência do déficit hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.

CONFALONE, A.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Eficiência de uso de la radiacion em distintas fases fenológicas bajo estres hidrico. **R. Fac. Agron.**, v. 17, n. 1, p. 63-66, 1997.

COSTA, L.C.; MORISON, J.; DENNETT, M. Carbon balance of growing faba bean and its effect on crop growth: experimental and modelling approaches. **R. Bras. Agromet.**, v. 4, n. 2, p. 11-17, 1996.

COSTA, L.C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C.R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, Hoboken, v. 39, p. 91-97, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FRANCA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acumulo de grausdia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer**: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii, 2003.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

MARTORANO, L.G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do Sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e Simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

MERCAU, J.L.; DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.J. et al. Predicting on farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Res.**, v. 100, p. 200-209, 2007.

MONTEITH, J.L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 68, n. 3-4, p. 220-231, 1994.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; PENGELLY, B.C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Res.**, v. 32, p. 1- 6, 1993.

NAKASEKO, N.; GOTOH, K. Comparative studies on dry matter production, plant type and productivity in soybean, azuki bean, and kidney bean. **Jpa. J. Crop Sci.**, v. 52, p. 49-58, 1983.

PENGELLY, B.C.; BLAMEY, F.P.C.; MUCHOW, R.C. Radiation interception and accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 63, p. 99-112, 1999.

PEREIRA, C.R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PROCÓPIO, S.O. et al. Análise do crescimento e eficiência no uso da água pelas culturas de soja e feijão e por plantas daninhas. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1345-1351, 2002.

REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO DO RS E SC – ROLAS. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CMPT, 1998. 223 p.

SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; COSTA, L.C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 147-153, 2003.

SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, New York, v. 65, p. 215-265, 1999.

SIVAKUMAR, M.V.K.; VIRMANI, S.M.; Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, p. 131-141, 1984.

SOUZA, P.J.D.P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P. et al. Solar radiation use efficiency by soybean under field conditions in the Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1211-1218, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

CAPÍTULO 5

BALANÇO DE CARBONO PARA UMA LAVOURA DE SOJA NO RS: FLUXO TURBULENTO DE CO₂ E A ESTIMATIVA DO MODELO CROPGRO-SOYBEAN

Resumo: O objetivo no presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean, parte integrante do DSSAT, na estimativa do balanço de carbono da cultura da soja. Foram então coletados, de acordo com a técnica de Covariância dos Vórtices Turbulentos, os dados experimentais de medição de fluxo de CO₂ nos diferentes estádios fenológicos da soja. O experimento foi conduzido pela Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigo (FUNDACEP), localizada no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul (28°36'S, e 53°40'W e altitude 409 m), durante o período de 14/12/2009 a 28/04/2010. De acordo com os resultados obtidos, o modelo CROPGRO-Soybean simulou a produção de carbono devido, provavelmente, ao balanço de carbono, não simulando o transporte de carbono na atmosfera. Por essa razão, apesar do modelo reproduzir o comportamento geral do fluxo de C, algumas variações em escala diária não conseguem ser capturadas.

Palavras-chave: DSSAT, plantio direto, dióxido de carbono, fotossíntese, respiração.

1. INTRODUÇÃO

Estudos desenvolvidos em diferentes partes do mundo têm mostrado que as condições climáticas futuras poderão ter impactos substanciais na produtividade das culturas (LUO et al., 2005; RICHTER; SEMENOV, 2005; ZHANG; LIU, 2005). Esses

impactos referem-se às taxas fotossintéticas, e de respiração, e à redução no ciclo das culturas.

O dióxido de carbono (CO₂) é considerado o mais importante gás do efeito estufa de origem antropogênica, cuja concentração aumentou de 280 ppm, no período pré-industrial, para 379 ppm em 2005 (INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2007). O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera exerce efeito positivo sobre as culturas, pois tende a aumentar a taxa de crescimento das plantas, por ser o substrato primário para fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2004). Plantas com metabolismo C₃, como a soja, são mais beneficiadas pelo aumento da concentração de CO₂ atmosférico do que aquelas com metabolismo C₄ (SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). No entanto, se o aumento da concentração de CO₂ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas devido ao encurtamento do ciclo (BUTTERFIELD; MORISON, 1992; SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração de manutenção (TAIZ; ZEIGER, 2004).

O aumento na concentração de CO₂ aponta para alterações na produtividade das lavouras. Segundo Lima (2005), em condições experimentais controladas, o aumento na concentração de CO₂ resultou em aumento entre 20% a 30% nas taxas de fotossíntese. Em relação à cultura da soja e os efeitos do dióxido de carbono atmosférico, Heinemann et al. (2006) conduziram experimentos em ambiente controlado e enriquecido com concentrações na faixa de 400 e 700 ppm e em diferentes níveis de temperaturas diurnas e noturnas respectivamente (20/15, 25/20 e 30/25°C). Os resultados apontaram aumento na biomassa total das plantas e no peso dos grãos quando o ambiente atingiu o nível de 700 ppm em condições de temperaturas amenas. No entanto, estudos dessa natureza são difíceis de serem executados, pois, o aparato experimental é oneroso e de manuseio complexo (ANDRESEN et al., 2001).

Diante de todos os aspectos e dificuldades operacionais dos experimentos em campo, os modelos de simulação de cultura surgem como ferramenta útil para criar cenários, avaliar impactos e definir medidas de adaptação para o setor agrícola mediante as expectativas das alterações do clima (HEINEMANN et al., 2008; TAO et al., 2008). Os modelos do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) têm sido usados nos últimos anos por pesquisadores de diferentes países do mundo, na avaliação das respostas da produtividade de várias culturas às mudanças futuras na

concentração de CO₂ e temperatura do ar (TUBIELLO et al., 2007; BRASSARD; SINGH, 2008; PATHAK; WASSMANN, 2009).

Entretanto, antes da aplicação dos modelos do sistema DSSAT em avaliações futuras do efeito das atuais mudanças climáticas, deve ser testada sua habilidade para simular os efeitos da concentração de CO₂ nos ecossistemas agrícolas. Alguns estudos em ambientes controlados foram realizados para testar a performance das simulações desses modelos (BOOTE et al., 2002; ALAGARSWAMY et al., 2006).

Neste aspecto, segundo Kosugi et al. (2008), existe grande necessidade da análise da variação nas magnitudes dos fluxos de CO₂ em ecossistemas, bem como o conhecimento de quais fatores controlam as trocas em diferentes escalas de tempo. Esse conhecimento passa ser primordial para o entendimento do papel dos fluxos de CO₂ no balanço de carbono global.

Com o desenvolvimento da instrumentação do Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos, informações sobre os fluxos de massa e energia em diversos ecossistemas, estão mais disponíveis para comparações entre as medidas feitas em campo e os resultados de simulações dos diferentes modelos existentes (BALDOCCHI, 2003). Desse modo, surgiram alguns questionamentos tais como: os padrões de resposta podem ser reproduzidos pelo sistema de suporte a decisão, DSSAT? Como a soja responde aos fluxos turbulentos de energia e CO₂ durante os diferentes estágios da cultura?

As respostas a esses questionamentos estão diretamente ligadas ao estudo das trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, com especial ênfase no gás carbônico. Portanto, há necessidade do desenvolvimento de medidas do fluxo de CO₂ na planta em seu ambiente natural para avaliação e performance dos modelos de simulação.

Neste sentido, com base nos dados experimentais de medição de fluxo de CO₂ pela técnica covariância dos vórtices turbulentos, no Rio Grande do Sul, foi desenvolvido o presente trabalho cujo objetivo principal foi a avaliação do desempenho do modelo CROPGRO-Soybean integrante do DSSAT no balanço de carbono da cultura da soja.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP), que está localizada no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, à 28°36' Sul, e 53°40' Oeste e altitude média de 409 metros (Figura 1).

O clima do local de estudo é considerado subtropical úmido, tipo Cfa, segundo a classificação climática de Köppen, com temperaturas variando entre 8,6 e 30°C, com média térmica de 18,7°C e precipitação pluviométrica de 1.774 mm por ano (dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP - 1974 a 2003).

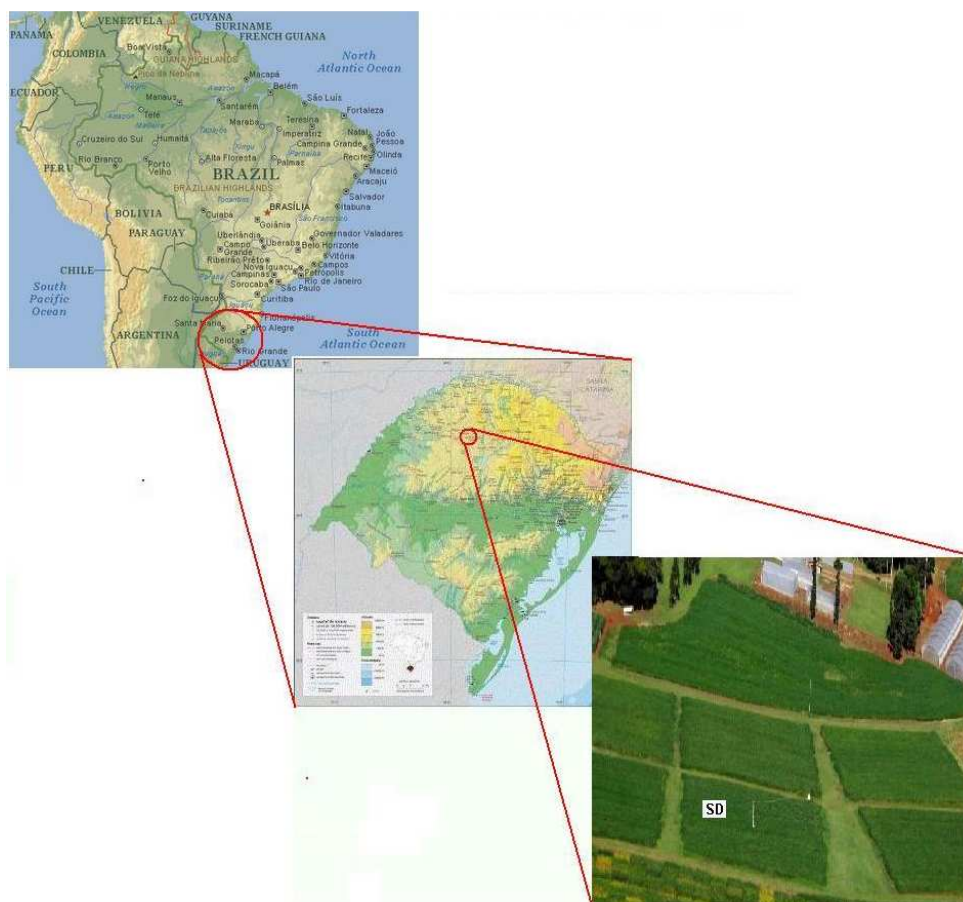


Figura 1 - Localização geográfica e vista aérea do sítio experimental com destaque para a parcela de sistema de plantio direto (SD) em Cruz Alta, RS.

2.2. Descrição do modelo CROPGRO-Soybean

As simulações foram realizadas utilizando-se o modelo CROPGRO-Soybean (*Crop-Environment Resource Synthesis*) (BOOTE et al., 1998a, 1998b e 2003), versão 4.0.2.0, pertencente ao sistema DSSAT, que simula crescimento, desenvolvimento e produtividade da soja (HOOGENDOORN et al., 2003), de acordo com a Figura 2. O modelo permitiu as simulações para as condições específicas de cada solo, dos principais processos físicos e fisiológicos da cultura, tais como fotossíntese, respiração, acumulação e partição da matéria seca, fenologia, crescimento foliar, de caules e de raízes, extração de água do solo, e evapotranspiração e produção da soja, em resposta à variação dos dados, meteorológicos diários, de precipitação pluvial, radiação solar global, temperaturas máxima e mínima do ar, os quais foram fornecidos ao modelo como dados de entrada. Também foram utilizados parâmetros de água no solo para avaliar o suprimento de água pela planta. A sensibilidade do modelo varia com a cultivar, a data de plantio, o manejo entre plantas e o manejo de irrigação.

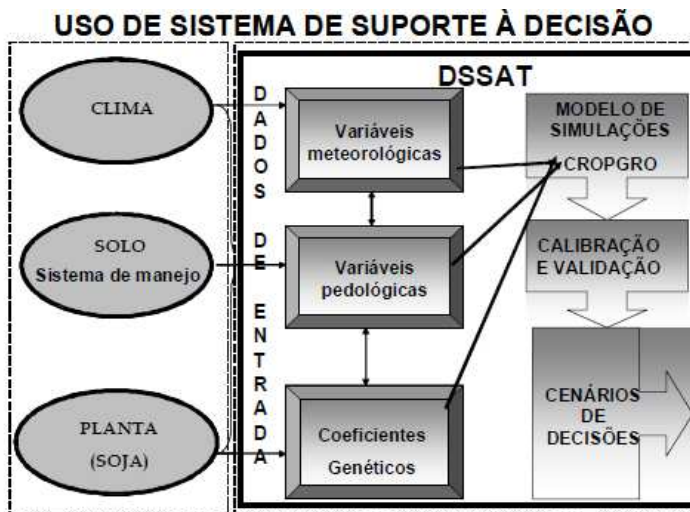


Figura 2 - Diagrama ilustrativo das variáveis que integram a base de dados do sistema atmosfera-solo-planta para as simulações do modelo CROPGRO-Soybean, no DSSAT.

2.3. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean

Para as condições experimentais do presente trabalho foram realizados a partir do ajuste nos coeficientes genéticos que caracterizam aspectos importantes da cultura, conforme recomendação de Hoogenbom et al. (2003) e Jones et al. (2003).

Para calibração dos coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean foram utilizado os dados da cultivar de ciclo precoce, FUNDACEP 53RR, semeada em 14 de dezembro de 2009, com espaçamento de 0,40 m entre linhas, e população de 300 mil plantas por hectare em sistema de plantio direto. Com este sistema de plantio todos os resíduos das culturas ficam depositados sobre o solo (Figura 3), para que depois da decomposição se incorporem lentamente à camada superficial do solo.



Figura 3 - Cultivo da soja no sistema de plantio direto (SD) em Cruz Alta. Na figura, observa-se a presença dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície.

Na Tabela 1 está apresentado o conjunto de informações fenológicas necessárias para a calibração dos coeficientes genéticos: florescimento, início da formação da vagem e enchimento de grão e, maturação fisiológica, índice de área foliar máximo e rendimento de grãos da cultura (kg.ha^{-1}).

Tabela 1 - Duração do período semeadura-florescimento (dias), semeadura-início da formação de grão, semeadura-início da formação da vagem semeadura-maturação fisiológica (dias), índice de área foliar máximo (m^2m^{-2}) e rendimento da cultura (kg ha^{-1}), para a cultivar Fundacep 53RR

Parâmetros da cultura requeridos	FUNDACEP 53RR
Florescimento (dias)	56
Formação da vagem (dias)	67
Enchimento de grão (dias)	81
Maturação fisiológica (dias)	120
Índice de área foliar máximo (m^2m^{-2})	6,1
Rendimento de grãos (kg.ha^{-1})	2.848

Os estágios fenológicos da soja foram determinados através da escala fenológica de acordo com Tsukahara e Kochinski, (2007), cujas principais etapas são apresentadas na Figura 4. Os estágios cuja denominação inicia com a letra “V” se referem aos diferentes períodos do estágio vegetativo. As denominações iniciadas com a letra “R” indicam as etapas do período reprodutivo da planta.

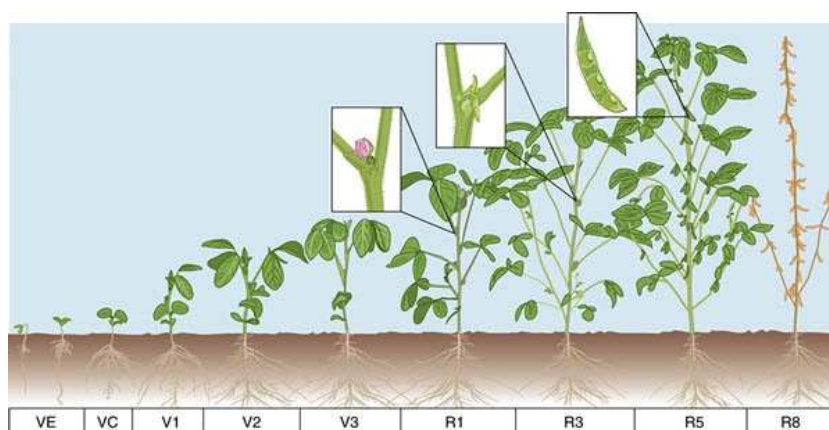


Figura 4 - Estágios fenológicos ao longo do desenvolvimento da cultura da soja.

O conjunto de variáveis meteorológicas de entrada utilizado pelo modelo foram dados diários de temperatura do ar, máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), precipitação pluvial (mm) e radiação solar (MJ.m^{-2}), velocidade do vento (m.s^{-1}), umidade relativa (%) coletados a partir da estação meteorológica automática (EMA) instalada acima da cultura da soja. Na Tabela 2 estão apresentadas as variáveis meteorológicas mensais durante o ciclo da soja na safra de 2009/2010. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico – LVd3 (EMBRAPA, 2006), com as características físico-hídricas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2 - Médias meteorológicas mensais durante o ciclo da soja na safra de 2009/2010

Meses	Tmax ($^{\circ}\text{C}$)	Tmin ($^{\circ}\text{C}$)	Rg (MJ.m^{-2})	UR (%)	V (m.s^{-1})	Prec. (mm)
Dezembro	32,27	20,16	26,17	73,77	3,7	105,4
Janeiro	29,08	18,86	21,51	80,95	3,0	258,2
Fevereiro	29,95	19,59	22,38	80,37	2,8	109,2
Março	28,85	17,05	20,56	77,94	3,0	55,4
Abril	25,63	13,80	14,65	72,54	3,3	186,2

Tmax = temperatura máxima do ar ; Tmin = temperatura mínima do ar; UR = umidade relativa; V = velocidade do vento; Rg = radiação solar global; Prec. = chuva.

Tabela 3 - Características físico-hídricas do solo encontrado no local de estudo

Profundidade (cm)	DG (g.cm^{-3})	CC ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	PMP ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	Fração do solo (%)		
				Areia	Silte	Argila
5	2,50	0,35	0,17	28,57	39,46	31,95
12	2,48	0,34	0,17	27,50	41,34	31,15
60	2,46	0,37	0,22	24,69	46,79	28,505

DG - Densidade global; CC - Capacidade de campo e PMP - Ponto de murcha permanente.

A correção do solo e a adubação da área experimental foram feitas por meio de análise do solo em concordância com as recomendações de Rolas (1998). Ou seja, utilizando-se 350 kg da formulação NPK de 0-20-20 por hectare na semeadura. O cultivo antecedente foi de aveia. A área foi dessecada com aplicação do herbicida glifosato. Foi realizado o controle das plantas invasoras remanescentes, quando necessário, com a aplicação do mesmo herbicida. O controle de doenças e pragas foi realizado de acordo com as práticas culturais recomendadas para o cultivo da soja, garantindo que o experimento ocorresse com a mínima interferência desses fatores.

Com os coeficientes genéticos ajustados da cultivar FUNDACEP 53RR (Tabela 4), realizou-se a simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura da soja para a região estudada.

Tabela 4 - Coeficientes genéticos da cultivar Fundacep 53RR calibrados no CROPGRO-Soybean, em Cruz Alta, RS, 2009/10

Cultivar	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF
FUNDACEP 53RR	12.83	0.303	33	7.5	18	42	18
LFMAX	SLAVAR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
1.03	355	170	1	0.15	13	2.05	8

em que CSDL, também definida como CSDVAR, representa o comprimento crítico do dia, acima do qual o processo de desenvolvimento reprodutivo não é afetado (horas); PPSSEN, inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para fotoperíodo com o tempo (1/hora); EM-FL, período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (R1) (dias fototermais); FL-SH, período entre o aparecimento da primeira flor e a primeira vagem (R3) (dias fototermais); FL-SD, período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação da semente (R5) (dias fototermais); SD-PM, período entre o início da formação da semente e a maturidade fisiológica (R7) (dias fototermais); FL-LF, período entre o aparecimento da primeira flor (R1) e final da expansão foliar (dias fototermais); LFMAX, taxa máxima de fotossíntese da folha a taxa ótima de temperatura 30°C; SLAVARN, área foliar específica sob condições padrão de crescimento; SIZLF, tamanho máximo da folha completamente expandida (cm²); XFRT, máxima fração do crescimento diário que é particionada para a semente mais a vagem; WTPSD, peso máximo por semente (g); SFDUR, duração do período de enchimento das sementes nas vagens, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); SDPDV, média de sementes por vagem, sob condições de crescimento padrão (dias fototermais); PODUR, tempo necessário para a cultivar alcançar condições ideais de vagens (dias fototermais).

2.4. Balanço de carbono

De acordo com Boote et al. (1998a), o balanço de carbono envolve além do processo de fotossíntese, no qual para a estimativa da fotossíntese total optou-se pelo cálculo da interceptação diária da luz pelo dossel da cultura; o processo de respiração, partição, remobilização de proteínas e carboidratos dos tecidos vegetais, e abscisão de partes da planta. Segundo Hoogenboom et al. (1992), a fotossíntese total diária do

dossel é influenciada pela temperatura média diária, IAF, conteúdo de N nas folhas, área foliar específica, déficit hídrico na planta, e espaçamentos entre linhas e entre plantas, e pode ser obtida segundo equação abaixo:

$$P_g = K_p * PGMAX(PAR) * f_L * f_0 * f_N * f_T$$

em que P_g é a fotossíntese bruta; $PGMAX(PAR)$, a resposta a radiação fotossinteticamente ativa; K_p , o coeficiente de ajuste (fertilidade do solo) = SLPF; f_L = 0 a 1 resposta a IAF; f_0 = 0 a 1 resposta ao suplemento de água; f_N = 0 a 1 resposta a concentração de nitrogênio na folha; e f_T = 0 a 1 resposta a temperatura diária.

2.5. Medidas micrometeorológicas

As medidas micrometeorológicas consideradas no presente trabalho foram obtidas a partir da Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas), correspondente ao período de novembro de 2009 a abril de 2010. Os fluxos foram medidos por meio do método da covariância dos vórtices turbulentos (BALDOCCHI et al., 1988), do tipo “*open path*”, o qual é composto de um analisador de gás infravermelho (IRGA) (LI-7500, Licor, Inc., Lincoln, NE) acoplado ao anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), usado para medir as flutuações dos componentes da velocidade do vento (Figura 5). Os sinais digitais desses instrumentos foram obtidos na frequência de 10 Hz e, as médias obtidas em intervalos de 30 minutos usando o *datalogger* CR23X da Campbell Scientific, onde os dados foram armazenados para o posterior processamento. As informações foram complementadas com medições da temperatura do ar (°C), direção do vento (°), velocidade do vento ($m.s^{-1}$), umidade relativa (%), radiação solar global ($W.m^{-2}$), saldo de radiação ($W.m^{-2}$), precipitação pluvial (mm), radiação PAR ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) e temperatura do solo (°C) (Tabela 5), as quais foram coletados durante o período experimental a partir da estação meteorológica automática (EMA) instalada acima da cultura da soja numa torre micrometeorológica de três metros de altura (Figura 5).

Tabela 5 - Instrumentos utilizados nas medições das variáveis meteorológicas coletadas na Estação Meteorológica Automática (EMA)

Variável medidas	Instrumento/Modelo	Altura
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Direção do vento ($^{\circ}$)	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Velocidade do vento (m.s^{-1})	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Umidade relativa (%)	<i>Probe HMP45C</i>	2 m
Radiação solar global (W.m^{-2})	Kipp&Zonen- CMP6	2 m
Saldo de radiação (W.m^{-2})	Kipp&Zonen NR LITE	2 m
Precipitação pluvial (mm)	Texas Instruments, INC	1,5 m
Radiação PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	PAR LIT Kipp&Zonen	2 m
Temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar Tipo E – TCAV-L Campbell Scientific	5 cm*

* Profundidade.



Figura 5 - Sistema *Eddy Covariance* estação meteorológica automática (EMA) instalada acima da cultura da soja em torre micrometeorológica.

2.6. Cálculos dos fluxos turbulentos

O método de covariância de vórtices (*Eddy Covariance*) foi utilizado para medir o fluxo de CO_2 , resultante da interação entre atmosfera e o campo agrícola de soja, assim como os fluxos de calor latente e sensível. Esse método permite determinar

o fluxo convectivo de CO₂ (fotossíntese-respiração) e da umidade do ar (fluxo de calor latente). De acordo com os trabalhos de Neves (2006) e Carneiro (2007), os fluxos turbulentos de CO₂ (Fc), calor sensível (H) e calor latente (LE) podem ser expressos, respectivamente, da seguinte forma:

$$F_c = \overline{\rho w' c'} + (\text{termos de correção webb})$$

$$LE = \rho L_v \overline{w' q'}$$

em que w' representa a variação da componente vertical da velocidade do vento em relação à sua média, ρ_c' representa a variação da densidade do escalar c em relação à sua média, L_v representa o calor latente de vaporização da água; q' representa o desvio instantâneo a partir da média da umidade específica e a barra horizontal representa a média do produto em um intervalo de amostragem.

2.7. Eficiência do uso da água (EUA) na cultura da soja

A eficiência no uso da água (EUA) foi estimada por meio de regressão linear, entre os valores da quantidade de carbono assimilado (gC.m⁻²) e a água evapotranspirada no período, em que a EUA se refere à eficiência no uso da água da cultura em gC.mm⁻¹.ET.

2.8. Eficiência do uso da radiação (EUR) na cultura da soja

O cálculo da eficiência do uso da radiação (EUR) foi feito pela relação entre a quantidade de carbono assimilado por unidade de radiação fotossinteticamente ativa (MJ.m⁻²), acumuladas até a data da amostragem correspondente a cada estágio fenológico estudado, em que a EUR se refere à eficiência no uso da radiação da cultura em g MJ⁻¹ de carbono.

2.9. Análise estatística

Os testes utilizados na comparação das estimativas do modelo foram o coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1985), e

de confiança (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), bem como o quadrado médio do erro (RMSE) de Loague e Green (1991), o desvio médio do erro (MBE) e o teste estatístico-t (Tabela 6).

Tabela 6 - Testes utilizados na comparação das estimativas do modelo

Teste	Equação
Coeficiente de correlação	$r_{Pi,Oi} = \frac{Cov(Pi, Oi)}{S_{Pi} \cdot S_{Oi}}$
Índice de concordância	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (P'i + O'i)^2} \right]$
Índice de confiança	$c = r * d$
Quadrado médio do erro	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{N}} + \frac{100}{M}$
Desvio médio do erro	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pi - Oi$
Teste-t	$t = \left[\frac{(N - 1) \cdot MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right]^{\frac{1}{2}}$

em que N é o número de observações; Pi é o valor estimado; Oi é o valor observado; P'i = Pi - M e O'i = Oi - M, sendo M a média da variável observada.

Os valores de coeficientes de correlação encontrados foram classificados seguindo a metodologia de Hopkins (2009) (Tabela 7).

O menor valor de RMSE deve ser desejado, uma vez que ele indica o melhor desempenho do modelo utilizado na estimativa. Baixos valores de MBE devem ser esperados, valores positivos indicam superestimativa no cálculo da variável e vice-versa.

O critério adotado para interpretar o desempenho das estimativas do modelo pelo índice “c” é apresentado na Tabela 8.

Tabela 7 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação

Coeficiente de correlação “r”	Correlação
0,0 – 0,01	Muito baixa
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 0,9	Muito alta
0,9 – 1,0	Quase perfeita

Tabela 8 - Valores dos coeficientes de desempenho conforme Camargo & Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Correlação
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
< 0,30	Péssimo

Para determinar, através do teste-t, se o valor obtido pelo modelo é estatisticamente significativo, é necessário determinar um valor crítico de “t” que é obtido com uso de tabelas padrões. Os dados estimados pelo modelo serão julgados estatisticamente significantes para um determinado coeficiente de confiança, quando o “t” calculado for maior que o valor crítico de “t” tabelado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Condições meteorológicas

Na Figura 6 está ilustrada a variação da temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar global e da precipitação pluvial ao longo de todos os estádios da cultura no período experimental. As condições de tempo para a safra agrícola 2009/2010 foram favoráveis para o desenvolvimento da cultura da soja, com precipitações frequentes e temperaturas apropriadas que permitiram obter um rendimento de grãos elevado (aproximadamente 48 sacas por hectare). A precipitação pluvial durante o ciclo da soja foi de 650 mm. Para o Rio Grande do Sul, Berlato et al. (1986) encontraram valor médio de consumo de água para todo ciclo da cultura da soja de 827 mm. Cabe ressaltar que durante o período vegetativo da cultura choveu em torno de 316 mm. Entretanto, de R3 a R5 foram computados 28 mm, sendo que a maior contribuição hídrica a área experimental foi de 21,0 mm, a 23/03/2010, e os demais milímetros restantes (7 mm) foram na forma de chuvas esparsas com baixo volume pluvial. O período entre R1 e R5 é considerado crítico para a soja quanto a oferta hídrica (MATZENAUER et al., 2003).

O total acumulado de radiação solar global (R_g), no período compreendido entre a semeadura e a maturação fisiológica da cultura da soja foi de 2498 MJ.m^{-2} , sendo a média de $21,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e os valores extremos de $34,1$ e $4,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. A temperatura do ar apresentou tendência de decréscimo até o final do ciclo da cultura. No ciclo da cultura, a temperatura média foi de $23,4^\circ\text{C}$, com médias das temperaturas extremas de $17,8^\circ\text{C}$ a $28,9^\circ\text{C}$ para as mínimas e máximas, respectivamente. As temperaturas máximas ficaram abaixo de 35°C e as mínimas foram predominantemente superiores a 10°C , ou seja, a cultura se manteve na faixa dos limites térmicos favoráveis durante o seu ciclo. Os dados corroboram com as afirmações de Berlato (1992) e Barni (1999) que o regime térmico não apresenta limitações a soja no Rio Grande do Sul.

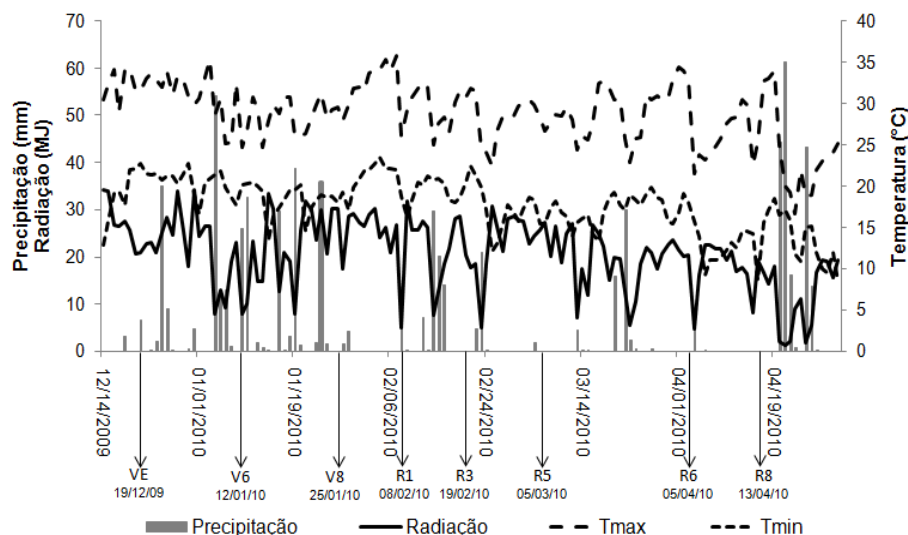


Figura 6 - Dados meteorológicos observados durante o ciclo da cultivar FUNDACEP 53RR para o ano de 2009/2010.

3.2. Índice de área foliar

A área foliar, que constitui o aparato de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, tem grande relevância na síntese e acúmulo de matéria seca pelos vegetais. A Figura 7 apresenta o índice de área foliar (IAF) simulado pelo modelo e observado em campo, para Cruz Alta, RS, na safra 2009/2010. As simulações do IAF pelo modelo acompanharam de perto as observações de campo durante a maior parte do ciclo de vida da soja. Porém, em termos quantitativos, o modelo tende a subestimar as observações. O modelo não previu bem a redução do IAF devido à senescência natural das folhas no período R6.

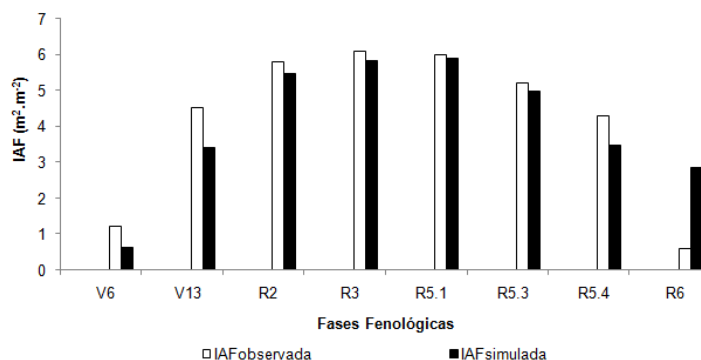


Figura 7 - Valores do índice de área foliar durante o ciclo da soja.

Deste modo, com o desenvolvimento dos sucessivos estádios fenológicos da soja, ocorre o aumento da área foliar da planta, aumentando, portanto, a capacidade de interceptação da luz incidente pelo dossel da cultura. Por tanto, é de se esperar que o influxo de carbono esteja diretamente relacionado com a radiação incidente, já que a maior capacidade de interceptação de luz, maior fotossíntese que determina a produção de massa seca.

3.3. Concentração de dióxido de carbono (CO₂)

Na Figura 8 pode ser observada a variação diária das concentrações de CO₂ ao longo do ciclo da cultura da soja. A concentração diária de CO₂ variou de 324 a 364 ppm, com valor médio de 344 ppm. Trabalhando com soja, Baldocchi (1983) encontrou valores de concentração de CO₂ para a cultura de até 370 ppm.

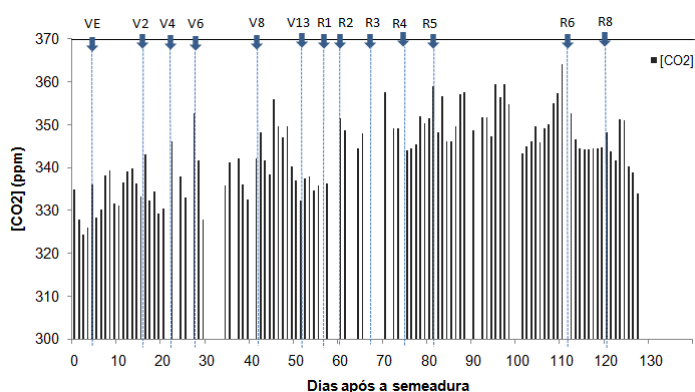


Figura 8 - Valores médios da concentração de CO₂ diária, durante os meses de dezembro de 2009 a abril de 2010.

3.4. Assimilação de carbono (Fc) no agroecossistema soja

O fluxo de CO₂ (Fc) medido pela técnica da Covariância dos Vórtices Turbulentos representa o termo turbulento do fluxo através da interface entre atmosfera e o ecossistema. O ganho de CO₂ pelo ecossistema representa perda de CO₂ para atmosfera. Dessa forma, valores negativos de Fc referem-se à predominância da

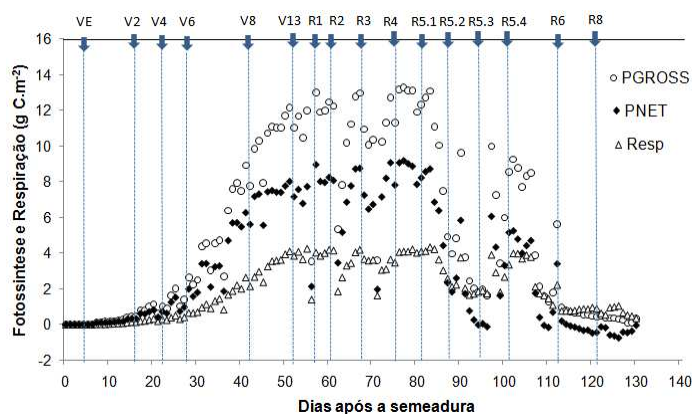


Figura 10 - Fotossíntese bruta (PGROSS), respiração (crescimento + manutenção) (RESP) e fotossíntese líquida (PNET) para ciclo da cultura da soja, simulados pelo CROPGRO-Soybean.

3.5. Eddy vs CROPGRO

Ao comparar os fluxos de carbono obtidos pela técnica dos vórtices turbulentos com os valores simulados do balanço de carbono do modelo CROPGRO, optou-se por igualar os sinais das magnitudes simuladas com as observadas em campo. Na Figura 11 está ilustrada a variação diurna dos fluxos de carbono ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja obtida em campo pelo método da covariância dos vórtices turbulentos (EDDY) e a simulada pelo CROPGRO-Soyben (CROPGRO). O modelo acompanha a tendência da assimilação diurna de forma satisfatória até a fase R6. No entanto, as magnitudes da absorção foram diferentes. No estágio R6 as folhas começam a amarelar e a cair (EMBRAPA, 2005). Portanto, o processo de fotossíntese é drasticamente diminuído. A partir deste estágio os dados experimentais indicam que o ecossistema da soja passa a ser fonte de carbono, sendo que o modelo segue indicando pequena absorção.

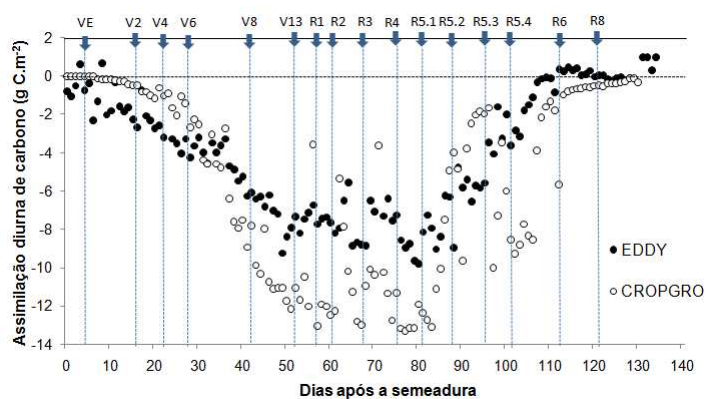


Figura 11 - Valores médios da assimilação diurna de carbono simulada pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

A Figura 12 ilustra o comparativo acumulado diurno de carbono assimilado usando dados do método de covariância de vórtices e as estimativas do modelo CROPGRO-Soybean. O modelo representa o total de assimilação diurna de carbono de forma não satisfatória.

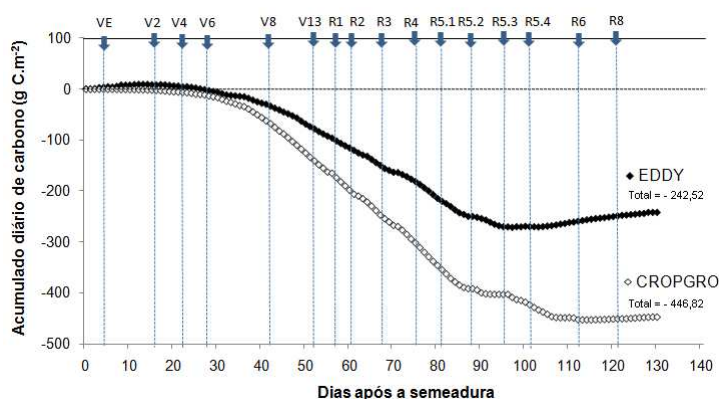


Figura 12 - Acumulado diurno de carbono simulado pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

Observa-se na Figura 13 a regressão linear entre assimilação diurna de carbono simulada pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja. O coeficiente de determinação foi de 0,72, valor bastante razoável, representando

um bom desempenho do modelo em simular a absorção de carbono para todo o período experimental.

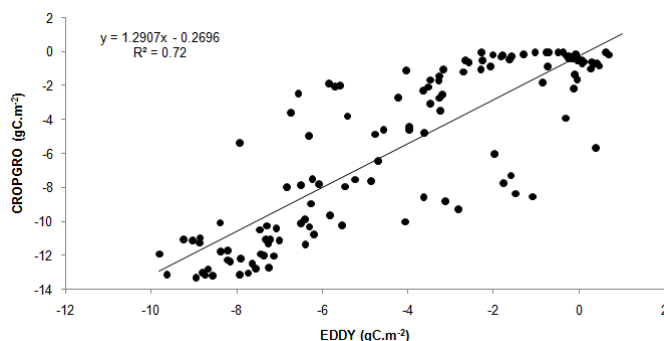


Figura 13 - Regressão linear entre assimilação diurna de carbono simulada pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

A respiração é o inverso da fotossíntese, embora as reações químicas dos dois processos sejam diferentes, pois a clorofila não está envolvida na respiração (FAN et al., 1990). Pode ser visualizada na Figura 14 a variação típica das taxas de respiração obtida em campo pelo método da covariância dos vórtices turbulentos (EDDY) e pelo CROPGRO-Soyben (CROPGRO). Os resultados para a troca líquida de carbono no período noturno, o que equivale à respiração noturna, apresentados pelo modelo se mostraram pouco consistentes em relação aos dados observados, principalmente, na fase vegetativa, o que deve, possivelmente, ser resultado da decomposição da camada de palha, formada por resíduos culturais, sobre a superfície do solo em sistema de plantio direto.

O acumulado de carbono liberado na respiração entre o simulado pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), estão representados na Figura 15. Os resultados apresentado mostram bom desempenho do modelo em reproduzir o total acumulado de carbono liberado para atmosfera pela soja. Embora o modelo apresente bom desempenho, é todavia muito impreciso com relação à magnitude desses fluxos, particularmente no início do ciclo, transpirando menos em relação à indicativa dos dados observados.

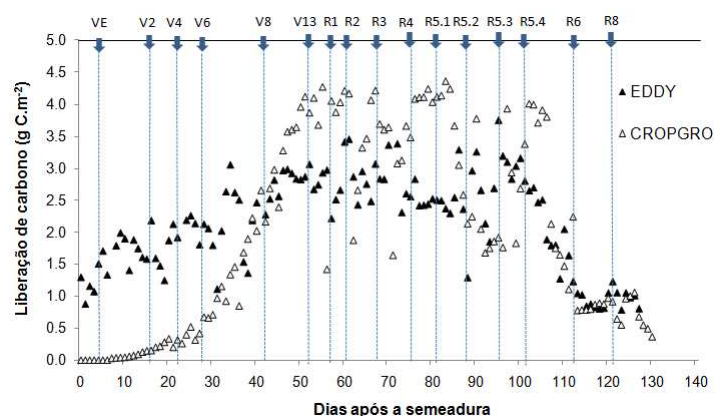


Figura 14 - Valores médios da liberação (emissão noturna) de carbono simulada pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

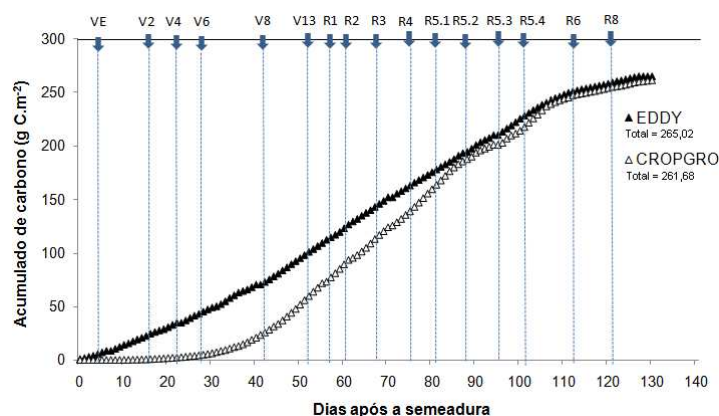


Figura 15 - Acumulado noturno (emissão) de carbono simulado pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

Na Figura 16 está apresentada a regressão linear entre liberação (emissão noturna) de carbono simulado pelo modelo (CROPGRO) e aquela obtida em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja. O coeficiente de determinação foi de 0,49, mostrando uma fraca capacidade do modelo CROPGRO-Soybean em simular a taxa de respiração, o que é motivado provavelmente, pela não representação da presença da palha sobre o solo, no cômputo da respiração pelo modelo.

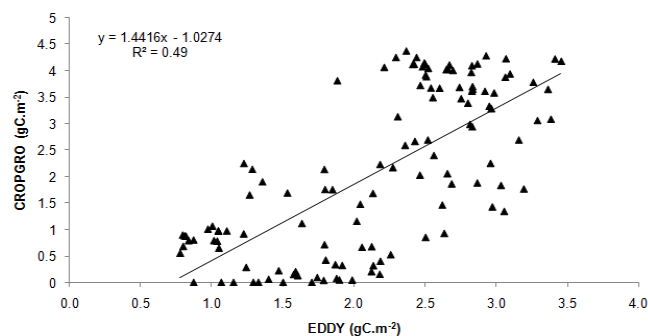


Figura 16 - Regressão linear entre liberação (emissão noturna) de carbono simulada pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

Os valores diários da assimilação de carbono simulada pelo modelo e obtido pelo método dos vórtices turbulentos são apresentados na Figura 17. Para condições de campo, a cultura da soja se comportou como ligeiro dreno de carbono, sendo este efeito mais pronunciado nos estádios fenológicos V13 a R5.3, o que indica que a taxa de absorção de carbono pela vegetação (fotossíntese) superou a liberação (respiração de plantas e solo), mostrando que é neste período que a planta de soja se desenvolve mais, provavelmente porque captura maior quantidade de CO₂ da atmosfera durante o dia e libera menor quantidade à noite. O modelo não representou a assimilação diária de forma adequada. A superestimativa por parte do modelo iniciou no estágio V8, e se estendeu até o final do ciclo da cultura. A partir do início do período de senescência foliar quando os dados observados indicaram que o ecossistema passou, novamente, a ser fonte de carbono para atmosfera, o modelo deixou de representar adequadamente a produção líquida da soja. Entretanto, o comparativo entre a assimilação diária de carbono na cultura da soja simulada pelo modelo e a observada em campo refletiram o crescimento das plantas. O aumento até estágio V13 e a posterior diminuição no curso da senescência permitiram verificar que a assimilação de carbono foi largamente influenciada pelo estágio de desenvolvimento em que a planta se encontrava. Segundo Griffis et al. (2004) o estágio fenológico e a fotossíntese desempenham um papel importante no fluxo de CO₂.

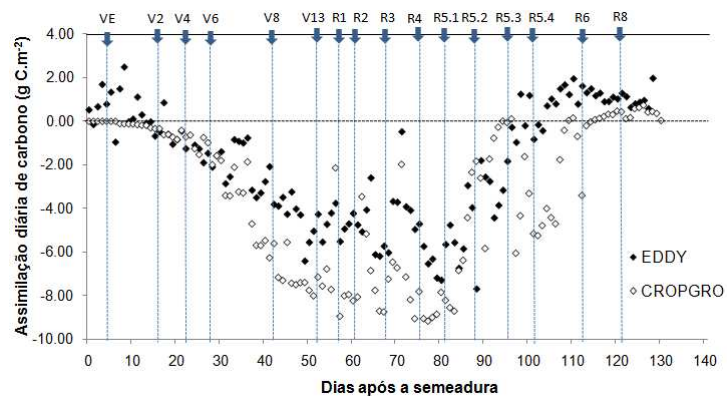


Figura 17 - Valores médios da assimilação diária de carbono simulada pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

Na Figura 18 é apresentada a curva acumulativa do total de carbono assimilado usando dados do método de covariância de vórtices e as estimativas do modelo CROPGRO-Soybean. Observa-se, que na maior parte do ciclo o modelo superestima a troca líquida de carbono. Esse resultado pode ser explicado pela forte subestimativa da assimilação diurna de carbono (fotossíntese bruta) pelo modelo (Figura 12). Nota-se, nesta figura, também que a lavoura de soja agiu como um sumidouro de carbono atmosférico, ou seja, este sítio contribuiu para a redução das concentrações de CO_2 na atmosfera.

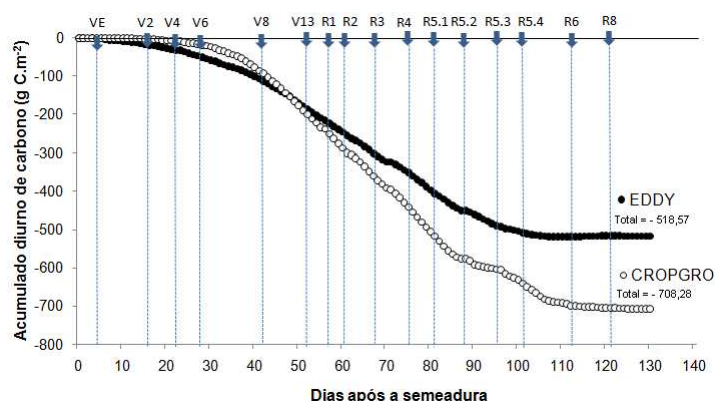


Figura 18 - Acumulado diário de carbono simulado pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

Com base nos resultados apresentados na Figura 19, o coeficiente de declividade da regressão linear ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja foi de 0,69. As inconsistências nos dados podem ser justificadas pela liberação de carbono decorrente da decomposição dos resíduos culturais na fase vegetativa as quais não são representadas pelo modelo CROPGRO-Soybean.

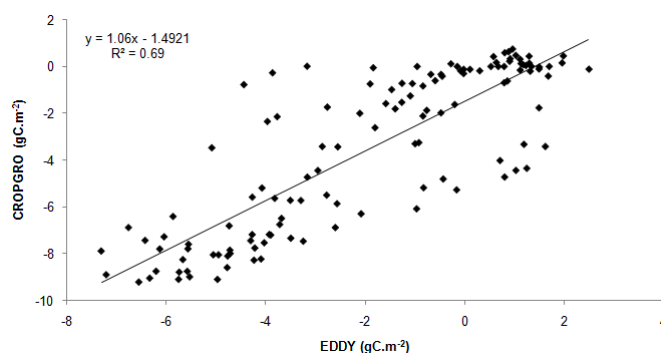


Figura 19 - Regressão linear entre assimilação diária de carbono simulada pelo modelo (CROPGRO) e obtido em campo (EDDY), ao longo do ciclo da soja.

Na Tabela 4 está o resultado da análise estatística entre os valores simulados e observados para o balanço de carbono ao longo do ciclo da soja. Os índices de concordância (d) entre os valores simulados e observados no diurno, noturno e diário são, respectivamente, 0,85, 0,70 e 0,83, caracterizando a boa concordância entre valores simulados e observados. Nota-se, nesta tabela, também que a relação entre dados simulados e observados é melhor nas condições em que o ecossistema se apresenta como sumidouro do que emissor de carbono.

Desse modo, o modelo CROPGRO-Soybean não simulou satisfatoriamente o transporte de carbono na atmosfera, apenas a produção de carbono devido ao balanço de carbono. Logo, apesar do modelo reproduzir o comportamento geral do fluxo de carbono, algumas variações em escala diária não conseguem ser representadas.

Tabela 4 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os obtidos para o balanço de carbono acima da cultura da soja

Carbono	gC.m ⁻²						t(calc)	t (5%)
	MBE	RMSE	r ²	r	d	c		
Diurno	-1.41	3,06	0,72	0,85	0,85	0,72	5,92	2,06
Noturno	-0.11	1,14	0,49	0,70	0,73	0,51	1,05	2,06
Diário	-1.58	2,45	0,69	0,83	0,84	0,70	9,65	2,06

3.6. Eficiência do uso da água (EUA) na soja

Segundo Lamaud et al. (1996), o desempenho da vegetação pode ser caracterizado pela eficiência de uso da água (EUA). Tal parâmetro expressa a eficiência com que a cultura utiliza água ao mesmo tempo em que realiza a fotossíntese. A EUA (EDDY) foi definida pela relação entre os fluxos diurnos de carbono e a evapotranspiração, ambos obtidos pela técnica de covariância de vórtices turbulentos, e a EUA (CROPGRO), pela razão entre a assimilação diurna de carbono (fotossíntese) e a evapotranspiração estimados pelo modelo CROPGRO-Soybean. Na Figura 20 são apresentadas as variações diurnas do carbono e da evapotranspiração para o período de três dias consecutivos em cada fase da cultura, sendo os observados (a) e simulados (b). Com base na distribuição dos dados verifica-se o comportamento semelhante entre os valores simulados e observados, com tendência de diminuição da assimilação de carbono e da evapotranspiração pela planta nos últimos estádios analisados.

Foi identificada boa relação entre a matéria seca produzida e a quantidade de água evapotranspirada durante o experimento (Figura 21). O valor da eficiência do uso da água pela soja, no experimento realizado em Cruz Alta, foi em torno de 1,7 gC.mm⁻¹.ET. O valor de EUR encontrado pelo modelo foi em torno de 1,5 gC.mm⁻¹.ET, com coeficiente de declividade da regressão linear entre matéria seca produzida e a quantidade de água evapotranspirada simuladas de 0,71.

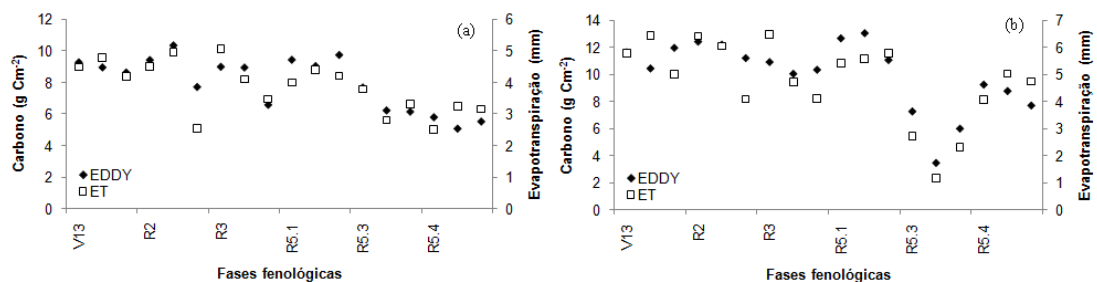


Figura 20 - Valores médios diurnos do carbono e da evapotranspiração para o período de três dias consecutivos em cada fase da planta.

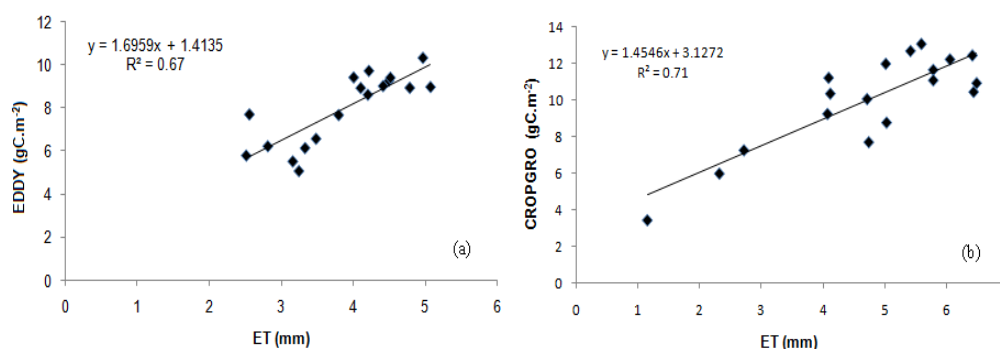


Figura 21 - Eficiência do uso da água pela soja para condições de campo e simuladas pelo modelo, em Cruz Alta, RS.

3.7. Eficiência do uso da radiação (EUR)

A eficiência no uso da radiação pela cultura foi definida como a quantidade de carbono assimilado (gC.m^{-2}) por unidade de radiação fotossinteticamente ativa (MJ.m^{-2}). Para modelar a relação entre o crescimento da planta e o ambiente físico, é importante entender o valor do carbono assimilado por unidade interceptada da densidade de fluxo da radiação disponível para fotossíntese na eficiência de uso da radiação. Na Figura 22, são apresentados os valores observados e simulados das variações diurnas do carbono e da radiação fotossinteticamente ativa. Destaca-se nos dados variabilidade considerável de um dia para outro, que pode ter sido causada pelos diferentes níveis de luz incidente. Suyker e Verma (2001) e Suyker et al. (2004) reportaram respectivamente uma relação significativa do fluxo de CO_2 com esta variável

em pastagens e culturas de milho, demonstrando que durante o pico de crescimento das culturas, o influxo apresenta forte resposta à radiação.

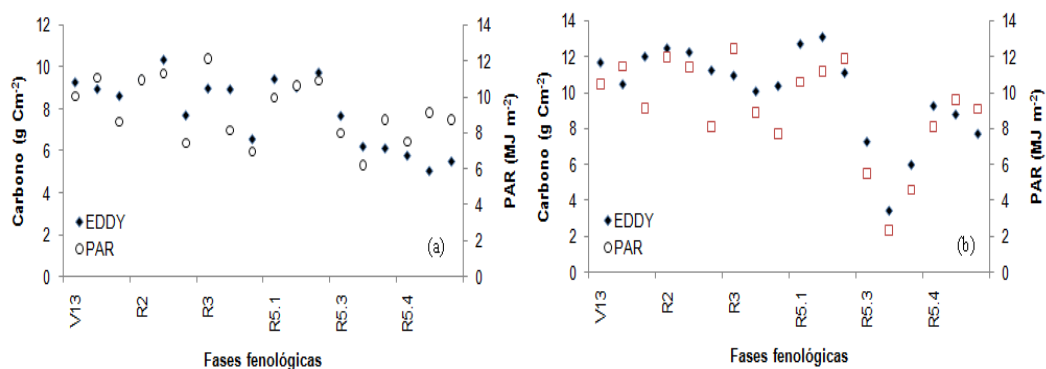


Figura 22 - Valores médios diurnos do carbono e da radiação fotossinteticamente ativa para o período de três dias consecutivos de cada fase da soja.

Com base na Figura 23, é possível identificar que a correlação entre os dados observados de assimilação diurna do carbono e a radiação fotossinteticamente ativa é extremamente baixa, com coeficiente de declividade da regressão linear de 0,46. O valor da eficiência no uso da radiação simulado pelo modelo foi de 0,79 gC.MJ⁻¹.PAR., com bom coeficiente de correlação; 0,73.

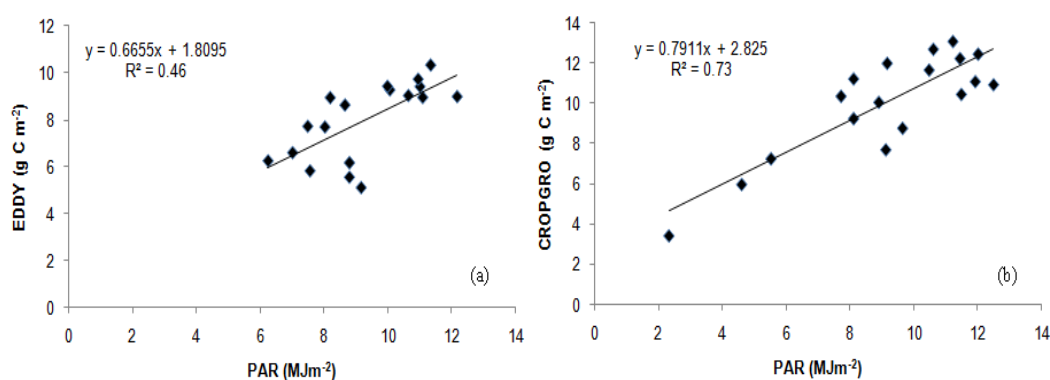


Figura 23 - Eficiência do uso da água pela soja em condições de campo e simuladas pelo modelo, em Cruz Alta, RS.

4. CONCLUSÃO

O fluxo de carbono obtido a partir do método da covariância dos vórtices turbulentos foi uma ferramenta eficiente para monitorar o balanço de carbono na cultura da soja ao longo do ciclo de crescimento da cultura. Os resultados confirmaram a elevada atividade fotossintética das plantas de soja com o aumento da área foliar durante o desenvolvimento dos sucessivos estádios fenológicos da cultura.

O modelo CROPGRO-Soybean não simula o transporte de carbono na atmosfera, apenas a produção de carbono devido ao balanço de carbono. Por essa razão, apesar do modelo reproduzir o comportamento geral do fluxo de carbono, algumas variações em escala diária não puderam ser identificadas e reproduzidas pelo modelo.

O modelo apresentou baixa capacidade em simular a taxa de respiração, o que pode, possivelmente, ter sido motivado pela não representação pelo modelo, no cômputo da respiração, da presença da palha sobre o solo.

Há, com base nos resultados, necessidade de incorporação nas estimativas do balanço de carbono pelo modelo CROPGRO-Soybean, dos efeitos da cobertura da superfície pelos resíduos culturais decorrentes da adoção do manejo de plantio direto.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAGARSWAMY, G.; BOOTE, K.J.; ALLEN, L.H.; JONES, J.W. Evaluating the CROPGRO-Soybean model ability to simulate photosynthesis response to carbon dioxide levels. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 34-42, 2006.

ANDRESEN, J.A. et al. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1059-1070, 2001.

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

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

BARNI, N.A. Práticas agrícolas para minorar o impacto das secas e racionalizar a irrigação. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1999. p. 116-125.

BERLATO, M.A. Condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 11-24.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque classe A e radiação solar global. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: M. Dekker, 1998a. p. 651-691.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. p. 99-128.

BOOTE, K.J.; PAN, D.; ALLEN, L.H. et al. **Evaluating the CROPGRO-Soybean model for predictions of phenology, growth, photosynthesis, and yield by comparison to elevated temperature and CO₂ experiments**. 2002.

BOOTE K.J.; JONES, J.W.; BATCHELOR, W.D. et al. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: links to field performance and genomics. **Agronomic Journal**, v. 95, p. 32-51, 2003.

BRASSARD, J.P.; SINGH, B. Impacts of climate change and CO₂ increase on agricultural production and adaptation options for Southern Québec, Canada. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 13, n. 3, p. 241-265, 2008.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2005. 374 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FAN, S.M. et al. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, p. 16851-16864, 1990.

GRIFFIS, T.J.; BLACK, T.A.; GAUMONT-GUAY, D. et al. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 207-223, 2004.

HEINEMANN, A.B.; MAIA, A.H.N.; DOURADO-NETO, D. et al. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. **European Journal of Agronomy**, v. 24, p. 52-61, 2006.

HEINEMANN, A.B.; LUQUET, D.; DINGHUN, M.; CHAPMAN, S. **Crop model assisted characterization of appropriate traits for rice TPE in Brazilian Cerrados**. 2008. Disponível em: <http://www.generationcp.org/UserFiles/File/c2_6_heinemann.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2011.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer**: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii, 2003.

HOPKINS, W.G. **Correlation coefficient, 2009**. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso: 10 jul. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

JONES, H.G. **Plants and microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 428 p.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, 2003. p. 235-265.

LAMAUD, E.; BRUNET, Y.; BERBIGIER, P. Radiation and water use efficiencies of two coniferous forest canopies. **Phys. Chem. Earth**, v. 21, n. 5-6, p. 361-365, 1996.

LIMA, M. Mudanças de temperatura e concentração de CO₂. In: BRASIL. Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Mudança do clima**. Brasília, 2005. v. 1, p. 171-174. (Cadernos NAE, 3).

LOAGUE, K.; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, p. 51-73, 1991.

LUO, Q.; BELLOTI, W.; WILLIAMS, M.; BRYAN, B. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 132, p. 273-285, 2005.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

McCREE, K.J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v. 14, p. 509-514, 1974.

NEVES, L.O. Fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente na cultura de caupi (*Vigna unguiculata* L.). 2006. 57 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PATHAK, H.; WASSMANN, R. Quantitative evaluation of climatic variability and risks for wheat yield in India. **Climatic Change**, v. 93, n. 1-2, p. 157-175, 2009.

REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO DO RS E SC – ROLAS. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CMPT, 1998. 223 p.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and water stress. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. p. 41-54.

RICHTER, G.M.; SEMENOV, M.A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, v. 84, p. 77-97, 2005.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa, 2001. p. 33-63.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. **Global Change Biology**, v. 7, p. 279-289, 2001.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agric. For. Meteorol.**, v. 148, p. 417-427, 2008.

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.; BURBA, G.G. et al. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 1-13, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAO, F.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z. et al. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 1, p. 94-110, 2008.

TUBIELLO, F.N. et al. Crop response to elevated CO₂ and world food supply. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 215-223, 2007.

WILLMOTT, C.J.; AKLESON, G.S.; DAVIS, R.E. et al. Statistic for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

ZHANG, X.C.; LIU, W.Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p. 127-142, 2005.

CAPÍTULO 6

CULTIVO DA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL: PERSPECTIVA ATUAL E FUTURA

Resumo: Projeções globais de clima, até o final deste século, apontam para aumentos de 1,1 a 6,4°C na temperatura superficial do planeta, mais ocorrências de eventos considerados extremos e concentração de CO₂ entre 730 a 1020 ppm. Estas alterações produzirão impactos significativos em todos os sistemas dinâmicos do planeta. Para o setor agrícola, por exemplo, o aumento da temperatura, secas e da concentração de CO₂, afetarão a duração do ciclo de desenvolvimento das culturas e o rendimento dos cultivos. Nesse sentido, modelos de simulação são ferramentas que permitem descrever interações dinâmicas que ocorrem no ambiente agrícola e reproduzem com qualidade os efeitos esperados devido as alterações futuras do clima dimensionados pelos diversos cenários de mudança climática. O objetivo deste trabalho foi avaliar os possíveis impactos na cultura da soja no Rio Grande do Sul, num cenário de mudança climática, que inclui o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂). Foi utilizado o modelo CROPGRO-Soybean (Crop-Environment Resource Synthesis) forçado por meio de simulações climáticas regionais (HadRM3), para o cenário climático de controle (1960 a 1990), e os cenários climáticos futuros B2 e A2 (2071 a 2100). Os resultados obtidos a partir das projeções dos cenários de mudanças climáticas regionais revelam uma tendência para aumento do rendimento da cultura da soja de até 15% em média, na região Noroeste Rio-grandense (maior produtora de soja), para o período de 2070 a 2100. O acréscimo de rendimento de grãos estimado resultou, essencialmente, das projeções da concentração de CO₂ e de temperatura para os cenários futuros, ou seja, os efeitos positivos derivados do aumento da concentração de CO₂ constituiu, provavelmente, a principal causa do aumento do rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: DSSAT, temperatura do ar, dióxido de carbono, produtividade, soja.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é uma oleaginosa com grande destaque na economia mundial, sendo que a produção mundial na safra de 2009/2010 foi de 259,7 milhões de toneladas, com área plantada de 102,0 milhões de hectares (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA, 2011). O Brasil tem destaque mundial por ser o segundo maior produtor, ficando atrás somente dos EUA, ressaltando a importância desta cultura para o país. No Brasil a área ocupada na safra 2009/2010 foi de 23,6 milhões de hectares, com produção de 68,7 milhões de toneladas e produtividade média da soja brasileira foi de 2911 kg por hectares (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2011).

No Rio Grande do Sul, nessa safra foram colhidas em torno de 9,5 milhões de toneladas de soja em numa área plantada de aproximadamente 3,8 milhões de hectares, posicionando-o como o terceiro maior produtor nacional de soja na safra 2009/10, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011).

Embora o Estado se destaque como um dos importantes referenciais na produção de soja no Brasil poderá ainda ter os rendimentos melhorados a partir da adoção de novas tecnologias e estudos que possam diminuir os riscos de quebra de rendimento, principalmente diante das mudanças climáticas aventadas por diversos setores da comunidade científica.

Nesse contexto, tem sido bastante discutido o fato de que o aumento da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera (entre eles, dióxido de carbono – CO₂, metano e óxido nitroso), devido às atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, tem contribuído consideravelmente para o aquecimento do planeta. As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono aumentaram de 278 ppm (partes por milhão) no período pré-industrial para 379 ppm, em 2005, excedendo os níveis dos últimos 800 mil anos (180 a 300 ppm). A taxa de aumento anual da concentração de CO₂ atmosférico foi em média 1,9 ppm no período de 1995 a 2005 e a tendência é atingir entre 730 a 1.020 ppm até 2100. Aliado a este fato, a temperatura média global no período de 1906 a 2005 aumentou 0,74°C, e há estimativa que em 2100 deva se elevar de 2 a 4,5°C, conforme as previsões do Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2007) e de Lüthi et al. (2008).

Estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (CGM) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1 a 6°C na temperatura

média do ar até o final do século XXI em vários locais do Planeta (IPCC, 2007), incluindo o Brasil (SIQUEIRA et al., 2001; ASSAD et al., 2004). As conclusões do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (2007) preveem um aumento de 1 a 6°C na temperatura média global até o ano de 2100. Para a região Sul do Brasil este relatório prevê aumentos de 1,5°C (no cenário mais otimista) a 5,5°C (no cenário mais pessimista) até 2100.

O efeito direto do incremento na concentração de CO₂ no desenvolvimento das plantas é a possibilidade de aumento da taxa de crescimento e da produtividade das culturas no futuro, uma vez que o CO₂ é o substrato primário para a fotossíntese. Deve-se ressaltar que as plantas C3, como a soja, terão maior benefício com o aumento de CO₂ do que plantas C4 (STRECK, 2005). Entretanto, um aumento na temperatura do ar pode reduzir ou anular os efeitos benéficos do CO₂ sobre as plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004; STRECK, 2005). As mudanças climáticas, segundo Aggarwal e Mall (2002), ainda podem causar efeitos indiretos na produção agrícola mundial, como alterações na disponibilidade de água para a irrigação, competição com pragas, doenças e invasoras, alterações na fertilidade do solo e erosão entre outras.

Em relação à cultura da soja e os efeitos do dióxido de carbono atmosférico, Heinemann et al. (2006) conduziram experimentos sobre o efeito do ambiente controlado e enriquecido com concentrações na faixa de 400 e 700 ppm e em diferentes níveis de temperaturas diurnas e noturnas respectivamente (20/15, 25/20 e 30/25°C). Os resultados apontaram um aumento de biomassa total das plantas e no peso dos grãos quando o ambiente atinge nível de 700 ppm e a temperaturas amenas. No entanto, esses estudos dessas ordens são difíceis de serem executados, pois, o aparato experimental, é oneroso e de manuseio complexo (ANDRESEN et al., 2001).

Diante de todos os aspectos e dificuldades operacionais os modelos de simulação de cultura surgem como uma ferramenta útil para criar cenários, avaliar impactos e definir medidas de adaptação para o setor agrícola mediante as expectativas das alterações do clima (HEINEMANN et al., 2008; TAO et al., 2008). Os modelos do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), têm sido usados nos últimos anos por pesquisadores de diferentes países do mundo, na avaliação das respostas da produtividade de várias culturas às mudanças futuras na concentração de CO₂ e temperatura do ar (TUBIELLO et al., 2007; BRASSARD; SINGH, 2008; PATHAK; WASSMANN, 2009). Neste é possível simular o crescimento, o desenvolvimento, rendimento e diversos outros aspectos biofísicos para 27 culturas

agrícolas de grande importância socioeconômica para o mundo, inclusive a soja (HOOGENBOOM et al., 2003; ICASA, 2011).

Neste sentido, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de avaliar os possíveis impactos da mudança climática na cultura da soja no Rio Grande do Sul, num cenário de mudança climática, que inclui o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do modelo

Foi utilizado o modelo CROPGRO-Soybean (*Crop-Environment Resource Synthesis*), versão 4.0.2.0, pertencente ao sistema DSSAT, que simula crescimento, desenvolvimento e produtividade da soja (HOOGENBOOM et al., 2003). A dinâmica da simulação do modelo permite avaliar diferentes tipos manejos fitotécnicos, bem como, responder possíveis efeitos das alterações climáticas no desempenho da cultura, nomeadamente por incluírem a possibilidade de resposta a variações de concentração de CO₂ atmosférico, aumentos de temperatura e vários outros efeitos extremo do clima. A construção dos arquivos necessários para a simulação foi descrita detalhadamente por Boote et al. (1998a, 1998b e 2003).

2.2. Calibração do modelo CROPGRO-Soybean

A calibração do modelo CROPGRO-Soybean para as condições experimentais deste trabalho foram efetuados a partir do ajuste nos coeficientes genéticos que caracterizam aspectos importantes da cultura, conforme recomendação de Hoogenbom et al. (2003) e Jones et al. (2003).

Para calibração dos coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean foram utilizado os dados da cultivar de ciclo precoce, FUNDACEP 53RR, semeada em 14/12/2009, com espaçamento de 0,40 m entre linhas, e população de 300 mil plantas ha⁻¹ em sistema de plantio direto. Essa cultivar foi desenvolvida pela Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga (FUNDACEP) e suas principais características agrônômicas encontram-se listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características agronômicas da cultivar FUNDACEP 53RR

Características principais	FUNDACEP 53RR*
Grupo de maturação	6,1
Altura da planta	75 cm (baixa)
Peso médio de 100 grãos	15,0 g
Acamamento	Resistente
Densidade de semeadura	28-32 plantas/m ²
Resposta a adubação	Alta
Época de semeadura	Novembro
Ciclo	Precose
Área de adaptação	RS

Fonte: Adaptado de Cotrisoja (2011).

* Cultivar com excelente engalhamento, ampla estabilidade e adaptabilidade, boa tolerância ao estresse hídrico, cultivar geneticamente modificada para tolerância ao herbicida glyphosate (GLIFOSATO).

As variáveis meteorológicas: temperatura máxima e mínima do ar, radiação global e precipitação pluvial e os estádios da cultura no período do experimento (Figura 1); e os dados como classificação do solo, análise química e física (Tabela 2) foram obtidos do experimento de campo localizado na FUNDACEP, no município de Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul.

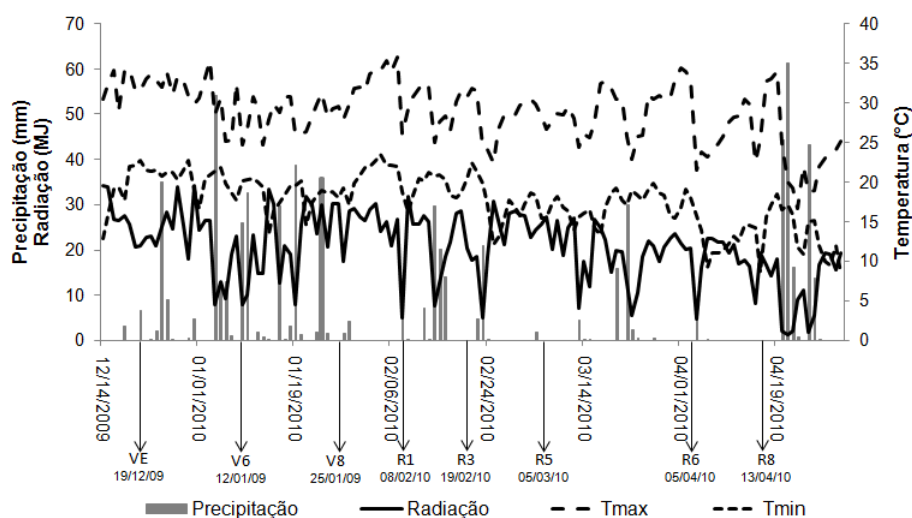


Figura 1 - Dados meteorológicos observados durante o ciclo da cultivar FUNDACEP 53RR para o ano de 2009/2010.

Tabela 2 - Características físico-hídricas do solo encontrado no local de estudo

Profundidade (cm)	DG (g.cm ⁻³)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)	Fração do solo (%)		
				Areia	Silte	Argila
5	2,50	0,35	0,17	28,57	39,46	31,95
12	2,48	0,34	0,17	27,50	41,34	31,15
60	2,46	0,37	0,22	24,69	46,79	28,505

DG - Densidade global; CC - Capacidade de campo e PMP - Ponto de murcha permanente. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico (EMBRAPA, 2006).

A correção do solo e a adubação da área experimental foram feitas por meio de análise do solo em concordância com as recomendações de Rolas (1998). Ou seja, utilizando-se 350 kg da formulação 0-20-20 por ha na semeadura. O cultivo antecedente foi de aveia. A área foi dessecada aplicando o herbicida glifosato. Foi realizado o controle das plantas invasoras remanescentes, quando necessário, com a aplicação do mesmo herbicida. O controle de doenças e pragas foi realizado de acordo com as práticas culturais recomendadas para o cultivo da soja, garantindo que o experimento ocorresse com a mínima interferência desses fatores.

2.3. Coeficientes genéticos do modelo CROPGRO-Soybean

Na Tabela 3, são apresentados os coeficientes genéticos da FUNDACEP 53RR ajustados na calibração do modelo CROPGRO-Soybean para a estimativa do crescimento e do desenvolvimento da soja, para as condições de solo e de clima de Cruz Alta, RS. Os coeficientes genéticos CSDL, PPSN, EM-FL, FL-SH, FL-SD, SD-PM e FL-LF definem o desenvolvimento da cultura, enquanto que LFMAX, SLAVAR e SIZLF definem o crescimento vegetativo; os coeficientes XFRT, WTPSD, SFDUR, SDPDV e PODUR estão relacionados com a definição do crescimento reprodutivo. Primeiro calibrou-se os coeficientes genéticos e, posteriormente foram realizadas as calibrações de variáveis de crescimento da soja. Essa sequência foi seguida devido a dependência entre as variáveis de crescimento com a fenologia da cultura.

Tabela 3 - Coeficientes genéticos da cultivar Fundacep 53RR calibrados no CROPGRO-Soybean, em Cruz Alta, RS, 2009/10.

Cultivar	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF
FUNDACEP 53RR	12.83	0.303	33	7.5	18	42	18
LFMAX	SLAVAR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
1.03	355	170	1	0.15	13	2.05	8

em que CSDL, também definida como CSDVAR, representa o comprimento crítico do dia, acima do qual o processo de desenvolvimento reprodutivo não é afetado (horas); PPSN, inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para fotoperíodo com o tempo (1/hora); EM-FL, período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (R1) (dias fototermiais); FL-SH, período entre o aparecimento da primeira flor e a primeira vagem (R3) (dias fototermiais); FL-SD, período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação da semente (R5) (dias fototermiais); SD-PM, período entre o início da formação da semente e a maturidade fisiológica (R7) (dias fototermiais); FL-LF, período entre o aparecimento da primeira flor (R1) e final da expansão foliar (dias fototermiais); LFMAX, taxa máxima de fotossíntese da folha a taxa ótima de temperatura 30°C; SLAVARN, área foliar específica sob condições padrão de crescimento; SIZLF, tamanho máximo da folha completamente expandida (cm²); XFRT, máxima fração do crescimento diário que é particionada para a semente mais a vagem; WTPSD, peso máximo por semente (g); SFDUR, duração do período de enchimento das sementes nas vagens, sob condições de crescimento padrão (dias fototermiais); SDPDV, média de sementes por vagem, sob condições de crescimento padrão (dias fototermiais); PODUR, tempo necessário para a cultivar alcançar condições ideais de vagens (dias fototermiais).

2.4. Avaliação da calibração fenológica

A calibração fenológica do modelo foi conduzida entre comparações do crescimento e o acúmulo biomassa real e a simulada entre os dias contabilizados entre o plantio até o florescimento; definição do início da formação da vagem e enchimento de grão e, por fim, aspectos biofísicos caracterizadores da maturação fisiológica. Para isso, utilizaram-se os dados observados de florescimento, início da formação da vagem e enchimento de grão e, maturação fisiológica obtidos no experimento de campo realizado pela Fundacep, Cruz Alta, RS. Conforme apresenta a Tabela 4 o modelo simulou com precisão o desenvolvimento fenológico da cultivar de soja FUNDACEP 53RR. A proximidade dos valores simulados e observados no campo referente aos estádios fenológicos da soja também foram constatados por Martorano (2007) para a cultivar Fepagro RS-10. Assim, a estimativa da fenologia da cultura torna-se um forte indicador de seu desempenho, quando os coeficientes genéticos estiverem adequadamente calibrados.

Tabela 4 - Dados fenológicos para a soja, observados e simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean

Fenologia (dias)	Observado	Simulado	Diferença (dias)
Florescimento	56	55	1
Formação da vargem	67	66	1
Enchimento de grão	81	80	1
Maturação fisiológica	120	118	2

2.5. Avaliação do crescimento

Foram realizadas calibrações do modelo CROPGRO-Soybean para a determinação da massa de matéria seca da parte aérea (MS) e índice de área foliar (IAF), na variedade cultivada FUNDACEP 53 RR, em Cruz Alta, RS na safra 2009/2010. Na Figura 2, podem ser comparadas as variáveis observadas referentes ao crescimento da cultura (MS e IAF) com as simuladas para o conjunto de dados obtidos no experimento. De acordo com o resultado, o modelo superestima a biomassa. Algumas discordâncias entre biomassa observada e simulada foram informadas por Martorano (2007) e Mercau et al. (2007). Para o IAF, as simulações do modelo acompanharam de perto as observações de campo durante a maior parte do ciclo de vida da soja. O modelo previu a redução do IAF devido à senescência natural das folhas, 80 dias após da semeadura. Para observações, o pico do IAF foi de $6,17 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Já para as simulações do modelo do CROPGRO-Soybean o pico de IAF foi de $5,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Os resultados estão de acordo, em parte, com trabalhos anteriores realizados com modelo CROPGRO-Soybean (MARTORANO, 2007).

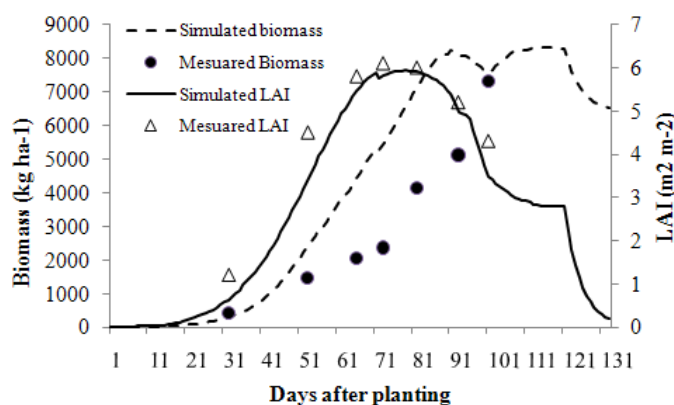


Figura 2 - Valores observados (obs) e simulados (sim), pelo modelo CROPGRO-Soybean, das variáveis (MS, kg ha^{-1} ; IAF, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) para o experimento em Cruz Alta, RS, 2009/10.

O modelo CROPGRO-Soybean estimou com elevada precisão o rendimento de grãos da cultivar de soja FUNDACEP 53 RR, para as condições de solo e de clima de Cruz Alta, RS, o que resultou numa diferença de $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ entre o valor observado ($2.848 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) e o simulado ($2.838 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) pelo modelo.

2.6. Técnicas culturais utilizadas nas simulações de longo período

O manejo fitotécnico da cultura como espaçamento e tratos foram semelhantes às utilizadas nos ensaios de campo cujos as medidas e arranjos agronômicos foram considerados integralmente para a calibração do modelo CROPGRO-Soybean. Contudo, outros pressupostos no ambiente agrícola foram assumidos.

Nas simulações usadas consideraram-se apenas as necessidades hídricas e nitrogenadas, definindo, igualmente a aplicação automática da adubação nitrogenada e da irrigação. Apesar de nos ensaios de calibração existirem datas fixas de adubação de plantio e de cobertura, optou-se por se aplicar o Nitrogênio “N”, automaticamente, sempre que necessário (isso favorece o crescimento pleno da cultura). A adubação ocorre quando se atinge um stress nitrogenado de 15%. Nas irrigações automáticas (rotina de água ligada com irrigação automática, do tipo aspersão com eficiência global de 90%), considerou-se a camada superficial de 0,30 m do perfil do solo como sendo de controle para o manejo das irrigações. O nível de esgotamento da água do solo foi

adotado como sendo 50% da água disponível. As lâminas de irrigação foram aplicadas para retornar o solo à capacidade de campo. O modelo considera que a irrigação é uniforme e que toda lâmina aplicada infiltra no solo.

2.7. Cenários de mudança climática

Os cenários de mudanças climáticas foram construídos a partir de dados gerados pelo modelo atmosférico regional HadRM3P aninhado no modelo acoplado oceano-terra-atmosfera HadCM3, recebendo a TSM (Temperatura da Superfície do Mar) prescrita produzida por esse modelo. Os dados diários (temperatura máxima e mínima do ar, precipitação pluvial e radiação solar) obtidos a partir do HadRM3 referem-se às simulações de controle (1960 a 1990), e às simulações com os cenários SRES (Special Report on Emission Scenarios) A2 e B2 (2071 a 2100). Estes cenários estão amplamente discutidos em Justino e Amorim (2007). O modelo regional HadRM3P foi desenvolvido no *Hadley Center* parte do projeto PRECIS (*Providing Regional Climate for Impacts Studies*), ou seja, sistema de modelagem do clima regional que apresenta descrição detalhada em Jones et al. (2004), que inclui uma descrição detalhada de HadRM3P. A escolha do modelo deveu-se ao fato de ter sido avaliado positivamente no terceiro relatório do IPCC (McAVANEY et al., 2001) e usado no projeto regional CREAS – Cenários Regionalizados de Clima Futuro da América do Sul (MARENGO et al., 2009). Os pontos de grade do modelo HadRM3 considerados para o estado do Rio Grande do Sul foram apenas pontos de terra, tendo sido excluídos todos os pontos cuja altitude fosse igual a 0 m (pontos de mar), como mostra a Figura 3.

2.8. Aplicação do modelo em cenários de mudança climática

Uma vez ajustado o modelo CROPGRO-Soybean com dados independentes, o rendimento de grãos de soja foi estimado nos diferentes cenários rodando-se o modelo, considerando o balanço de carbono, de água no solo e os níveis de CO₂ atmosférico, em cada um dos 30 anos presentes em cada cenário.

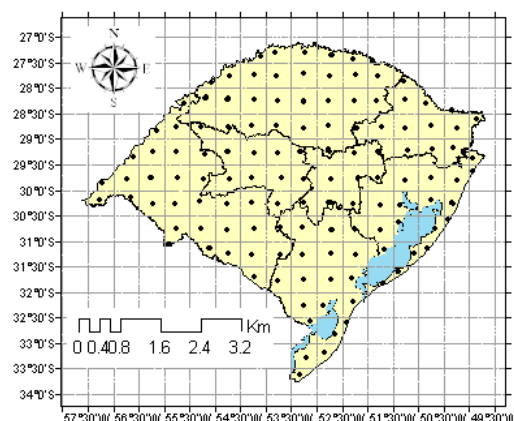


Figura 3 - Localização dos pontos de grade utilizados pelo modelo HadRM3, no estado do Rio Grande do Sul.

A análise dos dados foi realizada por meio do cálculo da mudança média percentual do rendimento simulado nos diferentes cenários de mudança climática em relação ao cenário controle (1960-1990), para cada data de semeadura. Considerou-se como valor de referência para este cálculo à média simulada no cenário controle, no mês recomendado atualmente para a semeadura da soja (cultivar FUNDACEP 53 RR) no estado do Rio Grande do Sul, que é novembro (simularam-se três épocas anuais de semeadura, 1º, 11 e 21 de novembro). A época preferencial para a semeadura foi definida a partir das recomendações técnicas do zoneamento agrícola para a cultura da soja no Sul do Brasil (BRASIL, 2011). No presente estudo, tal como foi citado, foi considerado que as doenças, pragas e infestantes estavam controladas, logo não foram consideradas aplicações de defensivos agrícolas. Idêntica consideração se estabeleceu para os resíduos e para as técnicas de mobilização de solo. As opções de manejo definidas para a cultura foram semelhantes para as condições climáticas de controle e futuras. Assim sendo, as diferenças de produtividade entre a situação atual e futura são apenas dependentes das alterações climáticas.

Nos cenários futuros, entre 2071 e 2100, foi definido o valor anual da concentração de CO₂ (ppmv) (IPCC, 2007) e para as simulações de controle, referentes aos anos de 1961 a 1990, foi considerado o valor dos registros de medições diretas de CO₂ na atmosfera em Mauna Loa, no Havaí (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>).

As características de solos utilizadas nas simulações de cálculo de balanço hídrico dos cenários climáticos foram compiladas da base de dados feita a partir do projeto RADAM-BRASIL (BRASIL, 1986), sempre buscando determinar o perfil de solo característico mais representativo de cada ponto de grade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Influência da mudança no clima agrícola regional na cultura de soja

Pode ser observada nas Figuras 4 e 5 as variações da temperatura média do ar projetadas pelo modelo climático regional do Hadley Centre – HadRM3, para os cenários B2 e A2 – considerando a situação de controle (1961 a 1990), de cenário futuro (2071 a 2100) e as diferenças entre os cenários distintos. Com relação ao período de cultivo da soja nas mesorregiões noroeste, sudoeste e centro ocidental no estado do Rio Grande do Sul (novembro a abril) é observado a predominância de temperaturas médias do ar mais elevadas. As temperaturas médias mais baixas estão localizadas, nas regiões nordeste e sudeste (Serra do Sudeste) do Estado, isso devido, possivelmente, as maiores altitudes, constituindo a região mais fria. A tendência de aumento da temperatura média nos cenários futuros, no período de novembro a abril, mostra valores crescentes no sentido leste-oeste do Estado, variando de 1,5°C a 2,6°C. Trabalhos realizados no estado do Rio Grande do Sul relatam aumentos de temperatura do ar em 10, entre 13, estações meteorológicas utilizadas no estudo e distribuídas em todo o Estado. Neste trabalho são observadas variações de temperatura do ar de até 2,1°C no período de 1916 a 2005, sendo que na última década (1996 a 2005), ocorreram os aumentos mais notáveis (MACHADO et al., 2007). Tal aquecimento parece ser devido, principalmente, a aumentos nas temperaturas mínimas diárias. Segundo Steinmetz et al. (2007) e Siqueira et al. (2007) em trabalhos realizados na estação agroclimática de Pelotas, RS, houve aumento da temperatura mínima de 1,11°C no período de 1893 a 2006, enquanto que a temperatura máxima pouco variou. Ainda, no Rio Grande do Sul, Marques et al. (2005) destacam que no período de 1948 a 2004, a tendência de aumento da temperatura mínima média anual, no período de outubro a dezembro, apresentou valores crescentes no sentido leste-oeste do Estado, variando de 0,8°C a 1,8°C.

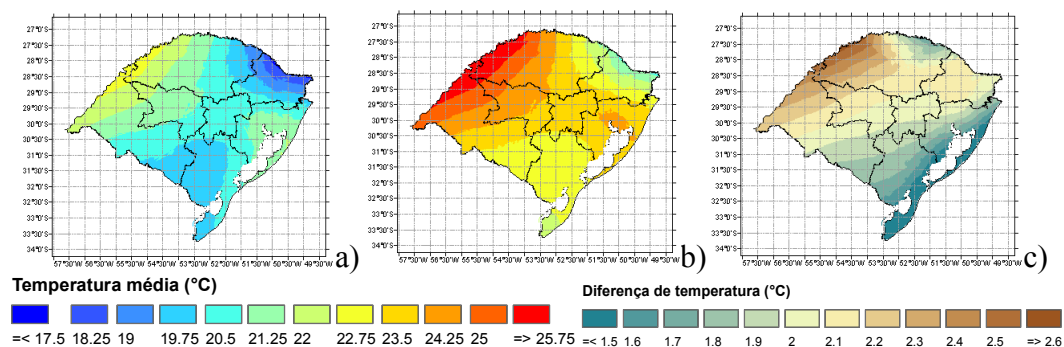


Figura 4 - Temperatura média do ar para o período de novembro a abril, cenários climáticos B2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro B2; (c) diferenças entre os cenários.

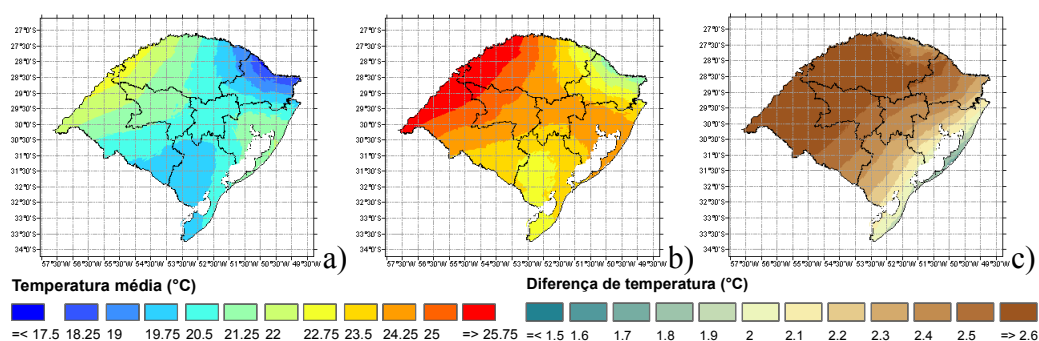


Figura 5 - Temperatura média do ar para o período de novembro a abril, cenários climáticos A2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro A2; (c) diferenças entre os cenários.

Pode ser observada nas Figuras 6 e 7 as variações da precipitação pluvial projetadas pelo modelo climático regional do Hadley Centre - HadRM3, para os cenários B2 e A2, considerando a situação de controle (1961 a 1990), de cenário futuro (2071 a 2100) e as diferenças entre os cenários distintos. A análise da precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul indica que existem diferenças no comportamento nas distintas regiões do Estado. A quantidade de chuva é menor nas regiões de maior latitude (porção sul do Estado) quando comparada com as regiões de menor latitude (porção norte), em especial, nordeste do Estado. O modelo climático estima que a região Nordeste do Estado registra a maior diferença do acúmulo médio anual, enquanto que a região sudoeste apresenta a variação menos acentuada. Marengo

(2007) relata que em 2100, a região Sul do Brasil registrará elevação no volume de chuvas de 5 a 10%; ou seja, chuvas mais concentradas. Regionalmente, os impactos das mudanças climáticas estão relacionados, em sua grande parte, pelo aumento na frequência e intensidade associado ao fenômeno climático El Niño (UNFCCC, 2007). O aumento na ocorrência de El Niño para o Brasil representa, genericamente, o aumento das precipitações pluviais médias para a região Sul. No último século, o evento vem se tornando cada vez mais marcante e com maior ocorrência no número de eventos de El Niño em relação aos de La Niña (HANSEN et al., 2006; BERLATO; FONTANA, 2003).

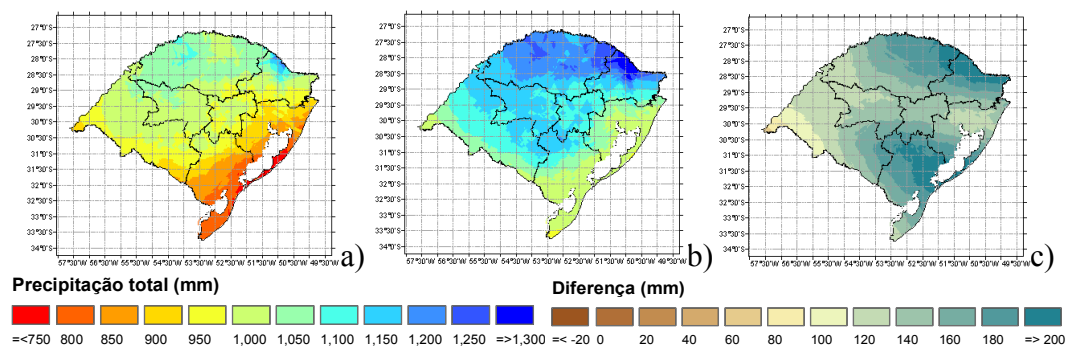


Figura 6 - Precipitação pluvial total para o período de novembro a abril, cenários climáticos B2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro B2; (c) diferenças entre os cenários.

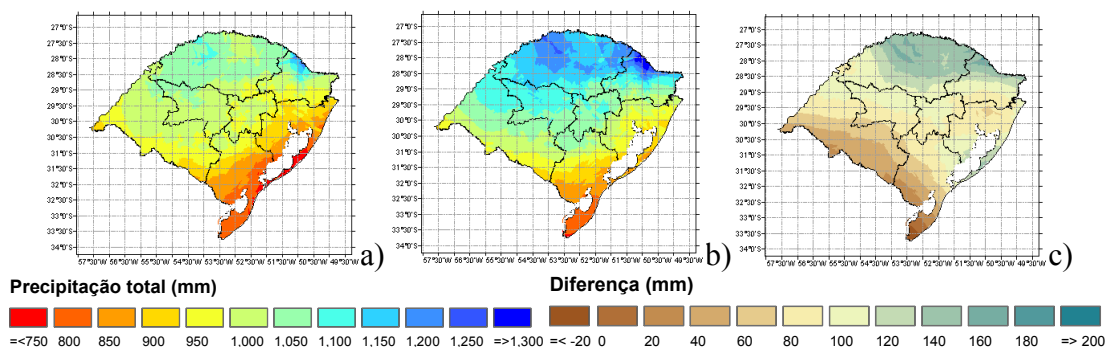


Figura 7 - Precipitação pluvial total para o período de novembro a abril, cenários climáticos A2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro A2; (c) diferenças entre os cenários.

3.2. Influência da mudança climática na duração do ciclo da cultura de soja

Mudanças na fenologia dos cultivos dão importantes evidências das respostas às recentes mudanças climáticas regionais. A alta correlação entre a temperatura do ar e o ciclo dos cultivos agrícolas permite identificar alterações no clima, através da antecipação ou atraso em algumas etapas do desenvolvimento das espécies. Segundo Siqueira et al. (2001) relatam que a principal causa da diminuição do rendimento de grãos das culturas é devido o encurtamento do ciclo de desenvolvimento, em cenários com aumentos de temperatura atmosférica, pois, algumas culturas queda no ciclo são bem representados por injúrias físicas, químicas e ambientais.

Na Figura 8 está apresentada a variação do ciclo fenológico da cultura da soja, para o cenário B2, considerando a situação de controle, de cenário futuro e as diferenças entre os cenários distintos. Nas simulações do modelo HadRM3, para todas as regiões do estado do Rio Grande do Sul ocorre o encurtamento do ciclo da cultura, essa situação ocorre devido, principalmente, ao aumento esperado da temperatura média do ar (Figura 4c). No cenário otimista (B2), de modo geral, as projeções reproduzem a tendência de redução em torno de 5 a 12 dias de ciclo (Figura 8b) em todas as regiões. Para Almeida (2005), temperaturas do ar mais elevadas e deficiência hídrica tendem a acelerar o desenvolvimento da planta em todas as fases.

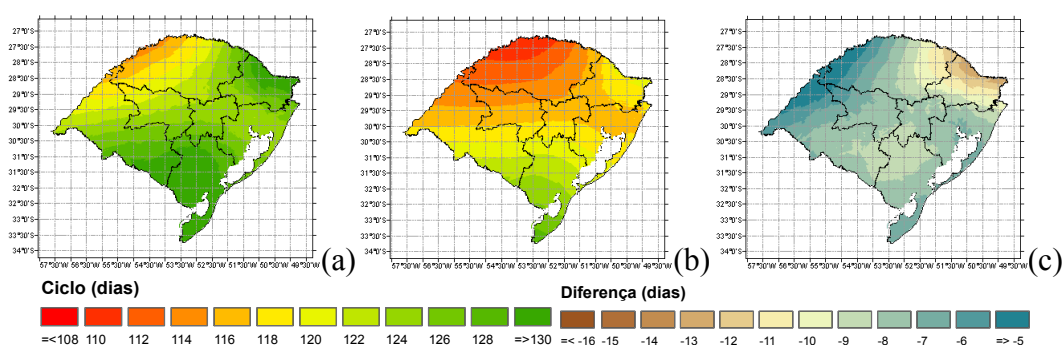


Figura 8 - Duração do ciclo da cultura de soja simulada com dados da simulação B2 do modeloHadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro B2; (c) diferenças entre os cenários.

Pode ser observada na Figura 9 a variação do ciclo fenológico da cultura da soja, para o cenário A2, considerando a situação de controle, do cenário futuro e diferenças entre os cenários distintos. As regiões nordeste e sudeste do Estado apresentam redução na duração da estação de crescimento da soja em até 16 e 10 dias (Figura 9c), respectivamente. Com base nos cenários do GISS, Siqueira et al. (2000) concluíram que o aumento de temperatura deveria reduzir o ciclo de cultivo da soja em sete dias na região Sul. Assim, os atuais resultados obtidos no presente trabalho destacam a importância da variabilidade térmica interanual entre novembro a abril, meses de cultivo, e seus impactos sobre a fenologia da cultura da soja. Isso pode implicar em possíveis alterações no calendário agrícola, pela modificação do ciclo da cultura, já que a mesma responde às oscilações na temperatura média do ar.

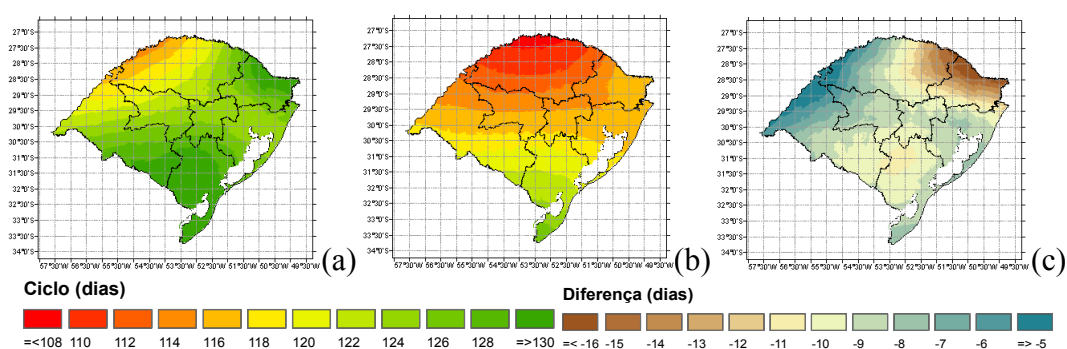


Figura 9 - Duração do ciclo da cultura de soja simulada com dados da simulação A2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro A2; (c) diferenças entre os cenários.

3.3. Influência a mudança climática no rendimento da cultura de soja

Foram simulados a partir dos dados de entrada do cenário climático de controle e o cenário climático futuro B2 e A2 no modelo CROPGRO-Soybean, o rendimento da cultura da soja para todo o estado do Rio Grande do Sul.

Na Figura 10 está apresentado o resultado das simulações realizadas com o modelo HadRM3 para a produtividade média da cultura da soja respectivamente, para a situação de controle, do cenário futuro B2, e para a variação de rendimento.

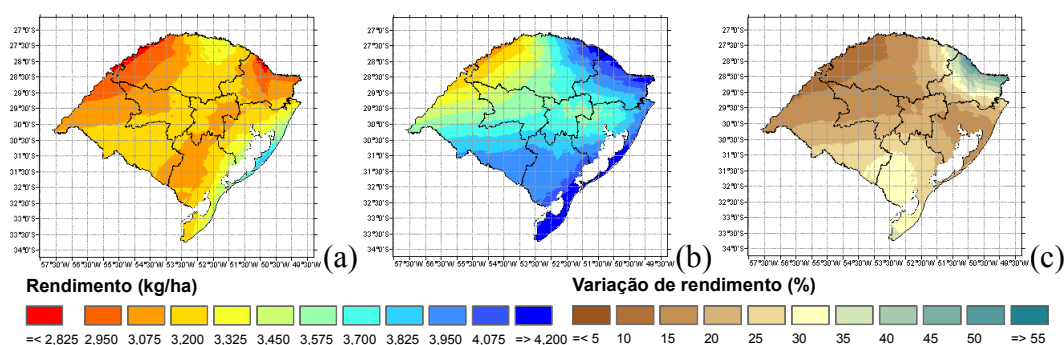


Figura 10 - Produtividade da cultura da soja simulada com dados da simulação B2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro B2; (c) variações de rendimento.

Pode ser observada na Figura 11 as simulações do modelo HadRM3 para a produtividade média da cultura da soja respectivamente, para a situação de controle, do cenário futuro A2, e para a variação de rendimento.

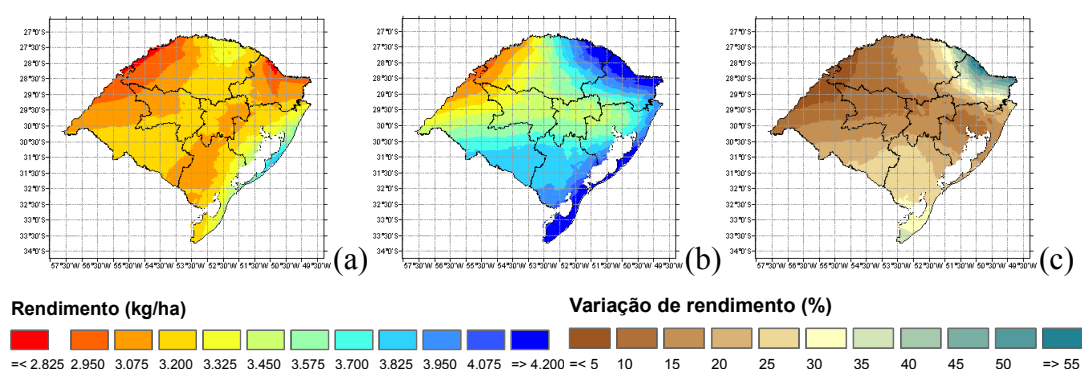


Figura 11 - Produtividade da cultura da soja simulada com dados da simulação A2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro A2; (c) variações de rendimento.

De acordo com os resultados obtidos nas Figuras 10 e 11, no geral, há certo acréscimo no rendimento da cultura da soja. Os rendimentos nos cenários futuros apresentam aumentos entre 5% e 55% comparativamente com as situações de controle, mostrando os efeitos positivos, possivelmente, derivados do aumento da concentração de CO₂, e dos efeitos negativos do aumento de temperatura do ar. O aumento da

concentração desse gás constituiu, provavelmente, a principal causa do acréscimo de rendimento em todo o Estado. Resultados semelhantes foram apresentados por Siqueira et al. (2000) que projetaram para a região Sul do Brasil acréscimos médios no rendimento da soja, em torno de 27%, como resultante de efeitos benéficos do aumento das concentrações de CO₂. De outro lado, segundo Streck e Alberto (2006) basta apenas o aumento de 6°C para que os efeitos benéficos do aumento de CO₂ no rendimento de soja sejam anulados.

Os acréscimos da produtividade para a cultura da soja no Rio Grande do Sul são mais evidentes nas simulações realizadas para o cenário B2, do que para o cenário A2. Essa diferença é justificada pelas projeções das precipitações pluviais para os dois cenários (Figuras 6 e 7). De acordo com os resultados dos dois cenários, a região Norte tem maior acréscimo no rendimento, enquanto que a região Oeste apresenta menores índices de rendimento. Este aumento pode ser explicado pelo aumento previsto pelo modelo dos valores da concentração de CO₂ na atmosfera. Segundo Streck et al. (2005) e Trnka et al. (2004), o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera tem elevado os níveis de produtividade da cultura, contribuindo para a redução da resistência estomática e da evapotranspiração, contribuindo para o aumento da eficiência do uso da água. Tubiello et al. (2007) citam que a chamada “fertilização do efeito estufa” pode provocar efeitos benéficos em locais onde ocorra grande concentração de CO₂, estimulando, assim, o crescimento vegetal. As expectativas para que tal fato pudesse ocorrer eram, essencialmente, para regiões temperadas, com expectativas de aumento no rendimento de 10% a 25% para cultivos com menor eficiência fotossintética (plantas cultivadas - C3), considerando que os níveis de CO₂ na atmosfera alcançassem a concentração de 550 ppm.

3.4. Influência da mudança climática no total de chuva e evapotranspiração durante o ciclo da cultura

A necessidade total de água pela cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm por ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (DOORENBOS; KASSAM, 1979; REICHARDT, 1990).

Nas Figuras 12, 13, 14 e 15 estão ilustrados, respectivamente, o total de precipitação pluvial e evapotranspiração (ET) durante o cultivo da soja nas situações de

controle, nos cenários futuros, assim como as diferenças entre os cenários futuros e as situações atuais. Para as condições controle, a soja recebeu cerca de 725 a 750 mm de água na região Noroeste rio-grandense (maior produtora de soja). Nota-se, todavia, que a região Nordeste apresenta as maiores médias de índice pluviométrico durante a estação de crescimento da soja no Estado, com precipitação média anual acumulada entre 750 a 850 mm, evidenciando, inclusive a influência orográfica da região. Na simulação para o cenário B2 existem realmente o aumento substancial da quantidade de precipitação pluvial acumulada de 20 até 95 mm. A avaliação da influência para o cenário A2, entretanto, demonstrou que, na parte Sudoeste/Nordeste Rio-grandense, durante o ciclo fenológico da soja, até a diminuição de, aproximadamente, 70 mm de precipitação pluvial pode ser esperado.

A investigação da ET indica que as regiões mais elevadas, por apresentarem temperaturas do ar mais baixas, possuem menor demanda evaporativa e, portanto, menores valores de ET da soja (415 mm). A faixa litorânea, assim como a região oeste, apresenta as maiores taxas de ET da soja, com média de até 525 mm, o que é coerente, pois esta região mantém, ao longo do período de novembro a abril, as maiores temperaturas do ar da área estudada. Por outro lado, nos cenários futuros B2 e A2, a ET mostrou tendência de decréscimo devido ao encurtamento da estação de crescimento e ao efeito da concentração de CO₂ no fechamento dos estômatos. Os resultados estão em concordância com as impressões de Streck (2005), que cita que o decréscimo da transpiração das plantas acontece devido ao fechamento estomático, estimulado pelas maiores concentrações de CO₂.

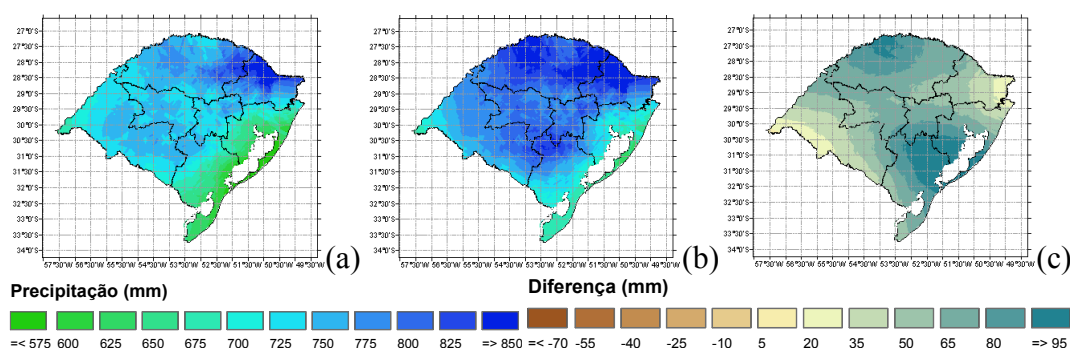


Figura 12 - Total de precipitação pluvial durante o ciclo da soja com dados da simulação B2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro B2; (c) diferenças entre os cenários.

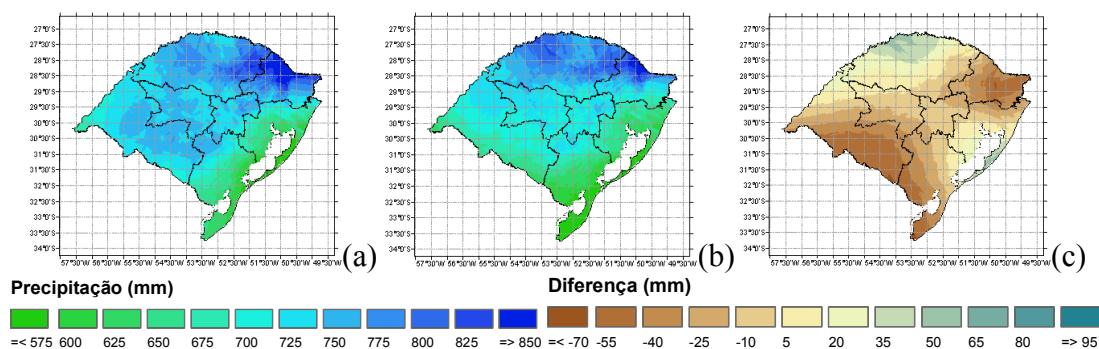


Figura 13 - Total de precipitação pluvial durante o ciclo da soja com dados da simulação A2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro A2; (c) diferenças entre os cenários.

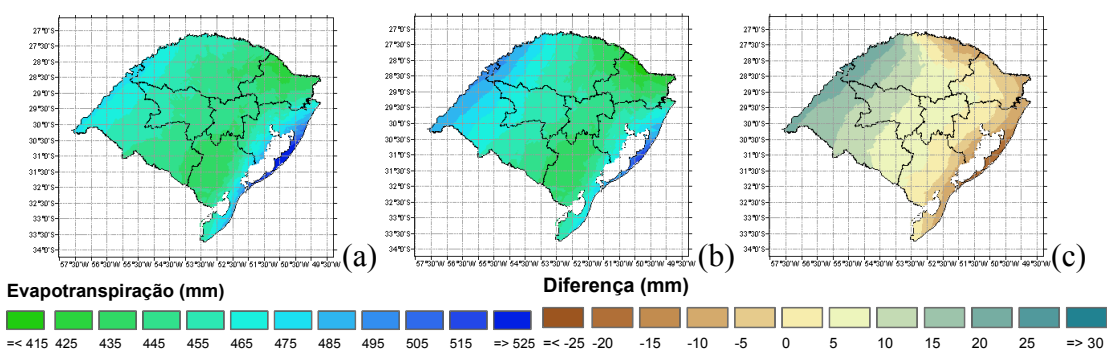


Figura 14 - Evapotranspiração durante o ciclo da soja com dados da simulação B2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro B2; (c) diferenças entre os cenários.

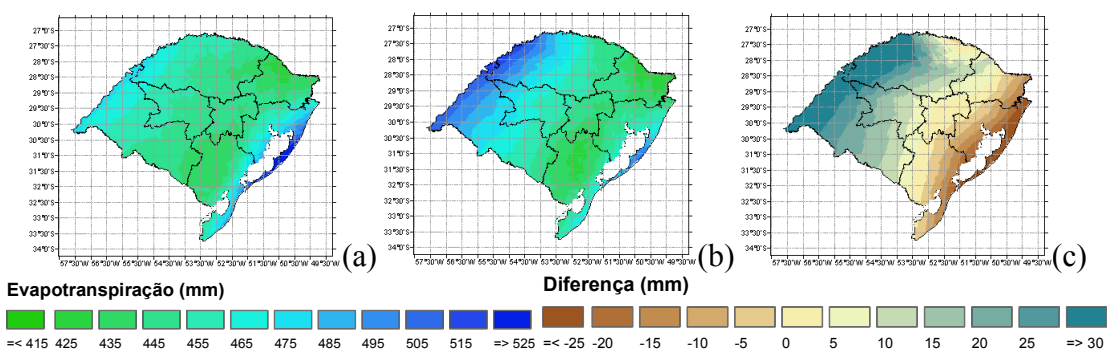


Figura 15 - Evapotranspiração durante o ciclo da soja com dados da simulação A2 do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro A2; (c) diferenças entre os cenários.

3.5. Influência da mudança climática na eficiência do uso de água na cultura de soja

A eficiência de uso da água na cultura da soja, variedade FUNDACEP 53RR foi calculada, dividindo a produção de grãos pela quantidade de água evapotranspirada, durante seu ciclo de cultivo, ou seja, kg (rendimento)/ha por mm (ET). A água evapotranspirada segundo Allen et al. (1998) inclui a água perdida pela transpiração das plantas e pela evaporação do solo. Na Figura 16 estão os resultados de eficiência de uso da água – QUE em inglês – alcançados na cultura da soja respectivamente para as situações de controle, e do cenário futuro B2 e A2. As WUE's calculadas nos cenários futuros (B2 e A2) são superiores aquelas da simulação de controle (18% e 15%). Os aumentos foram atribuídos, essencialmente, aos acréscimos de produtividade como consequência dos aumentos da concentração de CO₂.

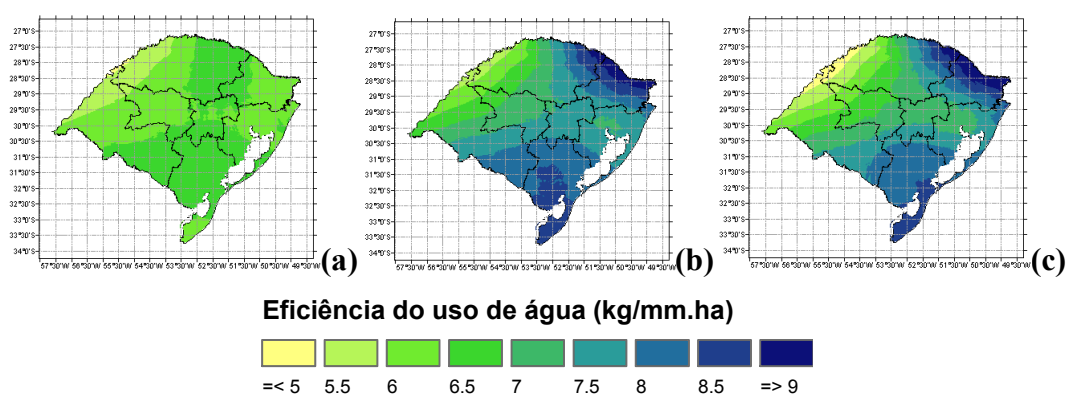


Figura 16 - Eficiência do uso de água durante o ciclo da soja com dados da simulação do modelo HadRM3: (a) situação de controle; (b) cenário futuro B2; (c) cenário futuro A2.

4. CONCLUSÕES

Baseado em projeções climáticas regionais a partir do modelo HadRM3 para o cenário climático de controle, futuro B2 e A2. Objetivou-se, com o presente estudo, avaliar o impacto da mudança climática na cultura da soja no Rio Grande do Sul, utilizando-se do modelo CSM-CROPGRO-Soybean do DSSAT v 4.0.2.0. Os resultados indicam que, o acréscimo de rendimento de grãos estimado resultou, essencialmente,

das projeções da concentração de CO₂ e de temperatura para os cenários futuros, ou seja, os efeitos positivos derivados do aumento da concentração de CO₂ (fertilização de CO₂) constituíram, provavelmente, a principal causa do aumento do rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. A tendência de aumento da concentração de CO₂ foi responsável pelo acréscimo de 15% da WUE no cenário mais pessimista.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, P.K.; MALL, R.K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. **Climatic Change**, Netherlands, v. 52, p. 331-343, 2002.

ALMEIDA, I.R. **O clima como fator de expansão da cultura da soja no Centro-Oeste**. 2005. 112 p. Dissertação (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.

ANDRESEN, J.A. et al. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1059-1070, 2001.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa, 2008. 84 p.

ASSAD, E.D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul – aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Eds.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: M. Dekker, 1998a. p. 651-691.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. p. 99-128.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; BATCHELOR, W.D. et al. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: links to field performance and genomics. **Agronomic Journal**, v. 95, p. 32-51, 2003.

BRASIL. RADAM Brasil 1973-1986. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 20 fev. 2011.

BRASSARD, J.P.; SINGH, B. Impacts of climate change and CO₂ increase on agricultural production and adaptation options for Southern Québec, Canada. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 13, n. 3, p. 241-265, 2008.

COOPERATIVA TRITÍCOLA TAPARENSE LTDA. – COTRISOJA. Disponível em: <<http://www.cotrisoja.com.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Soja**. Londrina, 2007. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/>>. Acesso em: 16 maio 2011.

HANSEN, J. et al. Global temperature change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 103, n. 39, p. 14288-14293, 2006.

HEINEMANN, A.B.; MAIA, A.H.N.; DOURADO-NETO, D. et al. Soybean (*Glycine max* L. Merr.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. **European Journal of Agronomy**, v. 24, p. 52-61, 2006.

HEINEMANN, A.B.; LUQUET, D.; DINGHUN, M.; CHAPMAN, S. **Crop model assisted characterization of appropriate traits for rice TPE in Brazilian Cerrados**. 2008. Disponível em: <http://www.generationcp.org/UserFiles/File/c2_6_heinemann.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2011.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer**: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

INTERNATIONAL CONSORTIUM FOR AGRICULTURAL SYSTEMS APPLICATIONS – ICASA. Disponível em: <<http://icasa.net>>. Acesso em: 14 fev. 2011.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; BOOTE, K.J. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT 4**. Honolulu: University of Hawaii, 2003. 269 p.

JONES, R.G.; NOGUER, M.; HASSELL, D. et al. **Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS**. Hadley Centre, 2004.

JUSTINO, F.; AMORIM, M.C. Projeções do clima da América do Sul segundo o cenário “B2” do IPCC adotando um modelo acoplado oceano-atmosfera-vegetação-gelo marinho. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 29-35, 2007.

KERR, R.A. Millennium’s hottest decade retains its title, for now. **Science**, Washington, v. 307, p. 828-829, 2005.

MACHADO, J.P.; BLANK, D.M.P.; ASSIS, S.V. Variação interdecadal da temperatura média do ar no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: UFS, 2007.

MARENGO, J.T.; AMBRIZZI, R.P.; ROCHA, L.M. et al. Future change of climate in South America in the late XXI Century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, DOI 10.1007/s00382-009-0721-6, 2009.

MARQUES, J.R.Q. et al. Aumento da temperatura mínima do ar no Rio Grande do Sul, sua relação com o aquecimento global e possíveis impactos no arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4, e REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26, 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2005. p. 224-226.

MARTORANO, L.G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e Simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

McAVANEY, B.J.; COVEY, C.; JOUSSAUME, S. et al. **Model evaluation**. In: HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J. et al. **Climate change 2001: the scientific basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 471-523.

MERCAU, J.L.; DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.J. et al. Predicting on farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Res.**, v. 100, p. 200-209, 2007.

MOLION, L.C.B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3-4, p. 7-24, 2008.

PATHAK, H.; WASSMANN, R. Quantitative evaluation of climatic variability and risks for wheat yield in India. **Climatic Change**, v. 93, n. 1-2, p. 157-175, 2009.

REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO DO RS E SC – ROLAS. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CMPT, 1998. 223 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

SIQUEIRA, O.J.W. et al. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa, 2001. p. 33-63.

SIQUEIRA, O.J.W. et al. Distribuição de médias e variabilidade de uma série histórica de dados climáticos diários, Pelotas, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: UFS, 2007.

STEINMETZ, S. et al. Influência do aquecimento global sobre as temperaturas máximas, mínimas e médias anuais na região de Pelotas, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: UFS, 2007.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 9, p. 1351-1359, 2006.

TAO, F.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z.; SAKAMOTO T.; YOKOZAWA, M. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 1, p. 94-110, 2008.

TRNKA, M.; DUBROVSKY, M.; SERERÁDOVÁ, S.; ZALUD, Z. Projections of uncertainties in climate change scenarios into expected winter wheat yields. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 77, p. 229-249, 2004.

TUBIELLO, F.N. et al. Crop response to elevated CO₂ and world food supply. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 215-223, 2007.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Climate change: impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries**. 2007. Disponível em: <http://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/txt/pub_07_impacts.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Soybean area, yield and production**. 2005. Disponível em: <<http://www.usda.gov>>. Acessado em: 16 maio 2011.

RESUMO E CONCLUSÃO GERAL

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, e o Rio Grande do Sul, o terceiro maior Estado produtor. Embora o Estado se destaque como um importante referencial na produção de soja no Brasil, poderá ter sua produtividade melhorada a partir da maior adoção de tecnologias. Sugere-se, também, a elaboração de estudos que possam diminuir os riscos de quebra de rendimento, principalmente aqueles associados às condições climáticas adversas, que podem provocar maior ocorrência de estresse hídrico, excesso de chuva e temperaturas elevadas do ar nas fases críticas do ciclo das culturas. Além disso, a cultura da soja tem passado, ao longo de sua história, por um grande processo de melhoramento genético, com o desenvolvimento de novas cultivares sempre adaptadas aos novos sistemas de cultivo. Assim sendo, é importante conhecer como a cultura interage com o meio ambiente e como se dará sua interação caso venham a ocorrer mudanças climáticas aventadas por diversos setores da comunidade científica. Nesse contexto, os modelos do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) têm sido usados nos últimos anos por pesquisadores de diferentes países do mundo, na avaliação das respostas da produtividade de várias culturas às mudanças futuras na concentração de CO₂ e temperatura do ar. Nele é possível simular o crescimento, o desenvolvimento e rendimento para 27 tipos de culturas, inclusive a soja. Entretanto, antes de aplicar os modelos do sistema DSSAT usados em avaliações futuras do efeito das atuais mudanças climáticas, deve ser testada sua habilidade para prever os efeitos da concentração de CO₂ nos ecossistemas agrícolas. Vale ressaltar que, 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 entre os fluxos de CO₂ entre a cultura e a atmosfera, associado aos componentes do balanço de radiação e de energia da cultura com as variáveis biofísicas relevantes que controlam as magnitudes desses fluxos. Portanto, a necessidade do desenvolvimento de medidas do fluxo de CO₂ na planta em seu ambiente natural para avaliação e performance dos modelos de simulação podem esclarecer pontos onde o conhecimento ainda é limitado, indicando prioridades na pesquisa. Nesse sentido, com o presente trabalho objetivou-se avaliar o desempenho do modelo CROPGRO-Soybean, parte integrante do sistema DSSAT, no balanço de carbono e de energia da cultura da soja com base nos dados experimentais de fluxos diurnos e noturnos de CO₂ obtidos em condições de campo pela técnica de covariância dos vórtices turbulentos. Com o objetivo de avaliar o fluxo de CO₂ no sistema solo-soja-atmosfera sob plantio direto (PD), desenvolveu-se estudo durante a safra agrícola de 2009/2010, conduzidos pela Rede Sulflux (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas) na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigô (FUNDACEP), em Cruz Alta, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. Os dados foram coletados por uma estação meteorológica automática montada em torre micrometeorológica de três metros de altura. Variáveis turbulentas foram medidas pelo anemômetro sônico tridimensional Campbell-3D (componentes de vento e temperatura) e pelo analisador de gás infravermelho Licor 7500 (H₂O e CO₂). O método da covariância dos vórtices (*eddy covariance*) foi utilizado para medir o fluxo de massa e energia que é resultante da interação entre a atmosfera e a cultura de soja.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- O balanço de energia da cultura apresentou adequado fechamento, indicando que o método da Covariância dos Vórtices Turbulentos foi capaz de reproduzir os fluxos de energia acima da cultura de soja de maneira satisfatória.
- O modelo CROPGRO-Soybean apresentou resultados satisfatórios na simulação da ocorrência de estádios fenológicos da cultura e rendimento de grãos, mas demonstrou limitações nas estimativas de biomassa e índice de área foliar da cultivar de soja avaliada para as condições de solo e clima de Cruz Alta, RS.
- O modelo CROPGRO-Soybean superestimou a evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura, devido aos efeitos da cobertura da superfície do solo pelos resíduos culturais no sistema de plantio direto, principalmente, no início do ciclo de desenvolvimento da soja.

- O modelo CROPGRO-Soybean apresentou boa capacidade de predição da radiação fotossinteticamente ativa incidente, para as condições, características do período e fatores considerados. Os valores da eficiência no uso da radiação também estiveram de acordo com a maioria dos valores obtidos em literatura.
- O modelo CROPGRO-Soybean não simulou o transporte de carbono na atmosfera, mas tão somente a produção de carbono devido ao balanço de carbono. Por essa razão, apesar do modelo reproduzir o comportamento geral do fluxo de carbono, algumas variações em escala diária não conseguem ser simuladas.
- Quanto aos impactos das alterações climáticas, os resultados indicam que o acréscimo de rendimento de grãos estimado resultou, essencialmente, das projeções da concentração de CO₂ e de temperatura para os cenários futuros, ou seja, os efeitos positivos derivados do aumento da concentração de CO₂ (fertilização de CO₂) constituiu, provavelmente, a principal causa do aumento do rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul.
- Há, com base nos resultados, necessidade de se incorporar os efeitos da cobertura da superfície pelos resíduos culturais do manejo de plantio direto nas estimativas do balanço de água e carbono do modelo CROPGRO-Soybean.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, P.K.; MALL, R.K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. **Climatic Change**, Netherlands, v. 52, p. 331-343, 2002.

ALAGARSWAMY, G.; BOOTE, K.J.; ALLEN, L.H.; JONES J.W. Evaluating the CROPGRO-Soybean model ability to simulate photosynthesis response to carbon dioxide levels. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 34-42, 2006.

ALBRIZIO, R.; STEDUTO, P. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, p. 254-268, 2005.

ALMEIDA, I.R. **O clima como fator de expansão da cultura da soja no Centro-Oeste**. 2005. 112 p. Dissertação (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.

ANDRESEN, J.A. et al. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1059-1070, 2001.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa, 2008. 84 p.

ASSAD, E.D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

AUBINET, M.; GRELLÉ, A.; IBROM, A. et al. Estimatives of the annual net carbon and water exchange of forests: the euroflux methodology. **Advances in Ecological Research**, New York, v. 30, p. 113-175, 2000.

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

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

BARNI, N.A. Práticas agrícolas para minorar o impacto das secas e racionalizar a irrigação. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1999. p. 116-125.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 25-32.

BERLATO, M.A. Condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 11-24.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul – aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque classe A e radiação solar global. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BLACK, C.; ONG, C. Utilisation of light and water in tropical agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 104, p. 25-47, 2000.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Eds.). **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: M. Dekker, 1998a. p. 651-691.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998b. p. 99-128.

BOOTE, K.J.; PAN, D.; ALLEN, L.H. et al. **Evaluating the CROPGRO-Soybean model for predictions of phenology, growth, photosynthesis, and yield by comparison to elevated temperature and CO₂ experiments.** 2002.

BOOTE K.J.; JONES J.W.; BATCHELOR, W.D. et al. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: links to field performance and genomics. **Agronomic Journal**, v. 95, p. 32-51, 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 20 fev. 2011.

BRASIL. RADAM Brasil 1973-1986. **Levantamento de recursos naturais.** Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

BRASSARD, J.P.; SINGH, B. Impacts of climate change and CO₂ increase on agricultural production and adaptation options for Southern Québec, Canada. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 13, n. 3, p. 241-265, 2008.

CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; LIGO, M.A.V. et al. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, p. 61-70, 2003.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

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.

CONFALONE, A.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Eficiência de uso de la radiacion em distintas fases fenológicas bajo estres hidrico. **R. Fac. Agron.**, v. 17, n. 1, p. 63-66, 1997.

CONFALONE, A.E.; NAVARRO, M.D. Influência do déficit hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.

COOPERATIVA TRITÍCOLA TAPERENSE LTDA. – COTRISOJA. Disponível em: <<http://www.cotrisoja.com.br>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

COSTA, L.C.; MORISON, J.; DENNETT, M. Carbon balance of growing faba bean and its effect on crop growth: experimental and modelling approaches. **R. Bras. Agromet.**, v. 4, n. 2, p. 11-17, 1996.

COSTA, L.C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C.R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, Hoboken, v. 39, p. 91-97, 1999.

CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F.; KLOSOWSKI, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira de Agrometeorologia**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 735-743, 2002.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; FARIA, R.T. et al. Ajuste e teste dos coeficientes genéticos do modelo de simulação Cropgro-soybean, para a região Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 363-371, 2005.

DALLACORT, R.; FREITAS P.S.L.; FARIA R.T. et al. Utilização do modelo Cropgro-soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Sci. Agron.**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 583-589, 2006.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; GONÇALVES, A.C.A. et al. Níveis de probabilidade de rendimento de quatro cultivares de soja em cinco datas de semeadura. **Acta Sci. Agron.** Maringá, v. 30, n. 2, p. 261-266, 2008.

DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; FARIA, R.T. et al. Soil water balance simulated by CROPGRO-Drybean model for edaphoclimatic conditions in Maringá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 351-357, 2010.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Effect of seasonal water stress on soybean and site specific evaluation of CROPGRO-Soybean model under semi-arid climatic conditions. **Agric. Water Manage**, v. 90, p. 56-62, 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2005. 374 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Soja**. Londrina, 2007. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/>>. Acesso em: 16 maio 2011.

FAN, S.M. et al. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, p. 16851-16864, 1990.

FARIA, R.T.; BOWEN, W.T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, n. 4, p. 489-498, 2003.

FERNANDES, E.J. Estudo do calor sensível e latente obtidos por intermédio da razão de Bowen em uma cultura de soja irrigada. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 3, p. 281-296, 2007.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 3, p. 411-418, 1991.

FRANCA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de gausdia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.

GIACOMONI, M.H. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

GRIFFIS, T.J.; BLACK, T.A.; GAUMONT-GUAY, D. et al. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 207-223, 2004.

GROSSI, M.C.; CHAVES, E.; JUSTINO, F.B.; SILVA, R.F. Influência das mudanças climáticas na produtividade da soja na Amazônia Legal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010.

HANSEN, J. et al. Global temperature change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 103, n. 39, p. 14288-14293, 2006.

HEINEMANN, A.B.; LUQUET, D.; DINGHUN, M.; CHAPMAN, S. **Crop model assisted characterization of appropriate traits for rice TPE in Brazilian Cerrados**. 2008. Disponível em: <http://www.generationcp.org/UserFiles/File/c2_6_heinemann.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2011.

HEINEMANN, A.B.; MAIA, A.H.N.; DOURADO-NETO, D. et al. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. **European Journal of Agronomy**, v. 24, p. 52-61, 2006.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer**: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii, 2003.

HOPKINS, W.G. **Correlation coefficient**, 2009. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso: 10 jul. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

INTERNATIONAL CONSORTIUM FOR AGRICULTURAL SYSTEMS APPLICATIONS – ICASA. Disponível em: <<http://icasa.net>>. Acesso em: 14 fev. 2011.

JAGTAP, S.S.; JONES, J.W. Predicting regional soybean yield and production: Adaptation of the CROPGRO soybean simulation model and scaling up yields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 93, p. 78-85, 2002.

JONES, H.G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 428 p.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; BOOTE, K.J. et al. **Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT 4**. Honolulu: University of Hawaii, 2003. 269 p.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

JONES, R.G.; NOGUER, M.; HASSELL, D. et al. **Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS**. Hadley Centre, 2004.

JUSTINO, F.; AMORIM, M.C. Projeções do clima da América do Sul segundo o cenário “B2” do IPCC adotando um modelo acoplado oceano-atmosfera-vegetação-gelo marinho. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 29-35, 2007.

KERR, R.A. Millennium’s hottest decade retains its title, for now. **Science**, Washington, v. 307, p. 828-829, 2005.

KUSS, R.C.R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. Santa Maria: UFSM, 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

LAMAUD, E.; BRUNET, Y.; BERBIGIER, P. Radiation and water use efficiencies of two coniferous forest canopies. **Phys. Chem. Earth**, v. 21, n. 5-6, p. 361-365, 1996.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W.A. et al. Balanço de energia em solo cultivado com feijão caupi no brejo Paraibano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004. **Anais...** 2004.

LIMA, M. Mudanças de temperatura e concentração de CO₂. In: BRASIL. Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Mudança do clima**. Brasília, 2005. v. 1, p. 171-174. (Cadernos NAE, 3).

LOAGUE, K.; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, p. 51-73, 1991.

LUO, Q.; BELLOTI, W.; WILLIAMS, M.; BRYAN, B. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 132, p. 273-285, 2005.

MACHADO, J.P.; BLANK, D.M.P.; ASSIS, S.V. Variação interdecadal da temperatura média do ar no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: UFS, 2007.

MARENGO, J.T.; AMBRIZZI, R.P.; ROCHA, L.M. et al. Future change of climate in South America in the late XXI Century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, DOI 10.1007/s00382-009-0721-6, 2009.

MARQUES, J.R.Q. et al. Aumento da temperatura mínima do ar no Rio Grande do Sul, sua relação com o aquecimento global e possíveis impactos no arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4, e REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26, 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2005. p. 224-226.

MARTORANO, L.G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do Sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e Simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

MAVROMATIS, T.; BOOTE, K.J.; JONES, J.W. et al. Repeatability of model genetic coefficients derived from soybean performance trails across different states. **Crop Sci.**, v. 42, p. 76–89, 2003.

McAVANEY, B.J.; COVEY, C.; JOUSSAUME, S. et al. **Model evaluation**. In: HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J. et al. **Climate change 2001: the scientific basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 471-523.

McCREE, K.J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v. 14, p. 509-514, 1974.

MEIRELLES, E.L.; PEREIRA, A.P.; SENTELHAS, P.C. et al. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 163-171, 2003.

MERCAU, J.L.; DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.J. et al. Predicting on farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Res.**, v. 100, p. 200-209. 2007.

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.

MOLION, L.C.B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3-4, p. 7-24, 2008.

MONTEITH, J.L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 68, n. 3-4, p. 220-231, 1994.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; PENGELLY, B.C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Res.**, v. 32, p. 1- 6, 1993.

NAKASEKO, N.; GOTOH, K. Comparative studies on dry matter production, plant type and productivity in soybean, azuki bean, and kidney bean. **Jpa. J. Crop Sci.**, v. 52, p. 49-58, 1983.

NEVES, L.O. **Fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente na cultura de caupi (*Vigna unguiculata* L.)**. 2006. 57 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NEVES, L.O. **Estimativa dos fluxos de massa e energia em uma cultura de soja (*Glycine max* (L) Merrill) utilizando-se o modelo CABLE**. 2011. 91 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NEVES, L.O.; COSTA, J.M.N.; ANDRADE, V.M.S. et al. Balanço de energia em uma cultura de feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.) no estado do Para. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, p. 21-30, 2008.

NIELSEN, D.C.; MA, L.; AHUJA, L.R.; HOOGENBOOM, G. Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRC models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 6, p. 1234-1243, 2002.

PATHAK, H.; WASSMANN, R. Quantitative evaluation of climatic variability and risks for wheat yield in India. **Climatic Change**, v. 93, n. 1-2, p. 157-175, 2009.

PENGELLY, B.C.; BLAMEY, F.P.C.; MUCHOW, R.C. Radiation interception and accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 63, p. 99-112, 1999.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, C.R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PROCÓPIO, S.O. et al. Análise do crescimento e eficiência no uso da água pelas culturas de soja e feijão e por plantas daninhas. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1345-1351, 2002.

REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO DO RS E SC – ROLAS. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CMPT, 1998. 223 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

RICHTER, G.M.; SEMENOV, M.A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, v. 84, p. 77-97, 2005.

RIGHI, E.Z.; ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, p. 367-379, 2007.

RITCHIE, J.T. A user orientated model of the soil water balance in wheat. In: FRY, E.; ATKIN, T.K. (Ed.). **Wheat growth and modeling**. New York: NATO-ASI Ser., 1985. p. 293-305.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and water stress. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. p. 41-54.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da Produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2005. 216 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

RUIZ-NOGUEIRA, B. et al. Calibration and use of CROPGRO-soybean model for improving soybean management under rainfed conditions. **Agric. Sys.**, v. 68, n. 2, p. 151-173, 2001.

SAITO, M.; MIYATA, A.; NAGAI, H.; YAMADA, T. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, p. 93-109, 2005.

SAN JOSÉ, J.J.; BRACHO, R.; MONTES, R.; NIKONOVA N. Comparative energy exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L.) Walp cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco llanos. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 116, p. 197-219, 2003.

SAN JOSÉ, J.J. et al. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour, and energy fluxes in pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Red Spanish] field using eddy covariance. **Photosynthetica**, v. 45, p. 370-384, 2007.

SANTOS, E.O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da Floresta Amazônica**. 1999. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; COSTA, L.C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 147-153, 2003.

SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001.

SILVA, T.J.A.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, C.R.; et al. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de bowen. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 392-403, 2007.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, New York, v. 65, p. 215-265, 1999.

SIQUEIRA, O.J.W. et al. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa, 2001. p. 33-63.

SIQUEIRA, O.J.W. et al. Distribuição de médias e variabilidade de uma série histórica de dados climáticos diários, Pelotas, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: UFS, 2007.

SIVAKUMAR, M.V.K.; VIRMANI, S.M.; Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, p. 131-141, 1984.

SOUZA, P.J.O.P. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia: impactos no balanço de energia e simulação do crescimento e rendimento da soja**. 2010. 284 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOUZA, P.J.D.P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P. et al. Solar radiation use efficiency by soybean under field conditions in the Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1211-1218, 2009.

STEINMETZ, S. et al. Influência do aquecimento global sobre as temperaturas máximas, mínimas e médias anuais na região de Pelotas, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: UFS, 2007.

STONE, F.L.; SILVEIRA, P.M.; MOREIRA, J.A.A.; BRAZ, A.J.B.P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 9, p. 1351-1359, 2006.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. **Global Change Biology**, v. 7, p. 279-289, 2001.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agric. For. Meteorol.**, v. 148, p. 417-427, 2008.

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.; BURBA, G.G. et al. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 1-13, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAO, F.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z. et al. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 1, p. 94-110, 2008.

TODD, R.W.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 335-348, 2000.

TRNKA, M.; DUBROVSKY, M.; SERERÁDOVÁ, S.; ZALUD, Z. Projections of uncertainties in climate change scenarios into expected winter wheat yields. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 77, p. 229-249, 2004.

TUBIELLO, F.N. et al. Crop response to elevated CO₂ and world food supply. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 215-223, 2007.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Climate change: impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries**. 2007. Disponível em: <http://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/txt/pub_07_impacts.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Soybean area, yield and production**. 2005. Disponível em: <<http://www.usda.gov>>. Acessado em: 16 maio 2011.

WILLMOTT, C.J.; AKLESON, G.S.; DAVIS, R.E. et al. **Statistic for the evaluation and comparison of models**. Journal of Geophysical Research, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

YOSHIMOTO, M.; OUE, H.; KOBAYASHI, K. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, p. 226-246, 2005.

ZHANG, Y.; ELOISE, K.; QIANG, Y. et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 64, p. 107-122, 2004.

ZHANG, X.C.; LIU, W.Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p. 127-142, 2005.