

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

**VALIDAÇÃO DO MODELO Agro-IBIS PARA UM
SÍTIO EXPERIMENTAL DE SOJA NO RIO GRANDE
DO SUL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Geovane Webler

Santa Maria, RS, Brasil

2011

VALIDAÇÃO DO MODELO Agro-IBIS PARA UM SÍTIO EXPERIMENTAL DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL

Geovane Webler

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

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Débora Regina Roberti

Santa Maria, RS, Brasil

2011

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

**A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**VALIDAÇÃO DO MODELO Agro-IBIS PARA UM SÍTIO
EXPERIMENTAL DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL**

elaborada por
Geovane Webler

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia

COMISSÃO EXAMINADORA:

Débora Regina Roberti, Dr^a.
(Presidente/Orientadora)

Otávio Costa Acevedo, Dr. (UFSM)

Santiago Vianna Cuadra, Dr. (CEFET/RJ)

Santa Maria, 24 de Março de 2011

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a. Débora Regina Roberti, pelo apoio constante, orientação dedicada e grande amizade.

Aos meus pais João Canísio e Cecília, pelo amor e apoio permanente. Aos irmãos Sandra, Simone e Geomar, cunhado Teonísio e sobrinha/afilhada Isabeli, pelo incentivo e carinho demonstrado.

À minha namorada Kerlin, pelo amor e companheirismo de todas as horas.

Aos amigos de dentro e de fora da Universidade, pelo convívio e amizade. Em especial aos colegas da sala “sem número”, por todos os bons momentos de trabalho e também de descontração.

Ao Dr. Santiago Vianna Cuadra, pela ajuda na instalação do modelo, nas simulações e participação na banca.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Meteorologia, por todos os ensinamentos.

À UFSM, pela oportunidade.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos integrantes da rede SULFLUX, pelos dados.

À Deus, por tudo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do modelo dinâmico de agroecossistemas Agro-IBIS.....	18
Figura 2 - Relação entre evapotranspiração relativa (%) e o período de crescimento da planta..	26
Figura 3 - Cultivo da soja no sistema de plantio direto (SD) em Cruz Alta.....	28
Figura 4 - Cultivo da soja no sistema de plantio convencional (SC) em Cruz Alta.....	29
Figura 5 - Localização geográfica e vista aérea do sítio experimental com destaque para as parcelas de sistema de plantio direto (SD) e convencional (SC) em Cruz Alta - RS.....	31
Figura 6 - Estágios fenológicos ao longo do desenvolvimento da cultura da soja.....	31
Figura 7 - Temperatura média diária e precipitação diária acumulada durante o ciclo da cultura.....	36
Figura 8 - Balanço de Energia no sítio experimental. (a) e (c) partição do saldo radiativo, (b) e (d) balanço de energia. Nos dois casos em superfície não vegetada e vegetada, respectivamente.....	37
Figura 9 - Índice de área foliar simulado e experimental.....	39
Figura 10 - Médias diárias das componentes do balanço de energia ao longo do ciclo da soja. (a) Fluxo de calor sensível, (b) fluxo de calor latente, (c) fluxo de calor no solo e (d) saldo de radiação.....	41
Figura 11 – Diagrama de dispersão para H (a) e LE (b).....	42
Figura 12 - Ciclo diurno das componentes do balanço de energia simuladas (Sim) e experimentais (Exp). Sim(1)-Exp(1) com a soja no estágio inicial de crescimento e Sim(2)-	

Exp(2) com o IAF máximo. (a) Fluxo de calor sensível, (b) fluxo de calor latente, (c) fluxo de calor no solo e (d) saldo de radiação.....42

Figura 13 - Temperatura do solo: (a) Média diária simulada e experimental. (b) Média diária simulada – média diária experimental. (c) Diagrama de dispersão entre valores simulados e experimentais.....44

Figura 14 - Valores simulados e observados do conteúdo de água no solo para as camadas 0-20 cm, 20-50 cm e 0-50 cm. (a) Médias diárias para as três camadas. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.....45

Figura 15 - NEE diurno (das 8 às 18 horas). (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.....47

Figura 16 – NEP diurno (8 às 18 horas). (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.....48

Figura 17 - NEE noturno (das 18 às 8 horas) (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.....49

Figura 18 - NEE diário. (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.....50

Fig. 19 - NEP diário. Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD.....51

Figura 20 - Evapotranspiração: (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.....52

LISTA DE SÍMBOLOS

A_g – Assimilação bruta de CO_2

C_p – Capacidade térmica do ar

C – Carbono

C_i - Concentração intercelular de CO_2

CO_2 – Dióxido de Carbono

DAP – Dias após o plantio

EUA – Estados Unidos da América

ET – Evapotranspiração

FUNDACEP - Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigo

G – Fluxo de Calor no Solo

GDD – Graus-dia de desenvolvimento

GPP – Produção Primária Bruta

H - Fluxo de Calor Sensível

h_a – Umidade relativa do ar

IAF – Índice de área foliar

IBIS – Integrated Biosphere Simulator

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

J_C – Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela Rubisco

J_e – Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz

J_S – Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela utilização da triose-fosfato

K – Condutividade hidráulica do solo

K_c – Coeficiente de Michaelis-Menten para o CO_2

K_n – Condutividade térmica do solo

K_o – Coeficiente de Michaelis-Menten para o O_2

LE – Fluxo de Calor Latente

N - Nitrogênio

NEE – Troca líquida de CO₂ do ecossistema

NEP – Produtividade líquida do ecossistema

NPP – Produção Primária Líquida

O₂ – Oxigênio

q – Densidade do fluxo de água no solo

q_{atm} – Umidade específica da atmosfera

Q_P - Radiação fotossinteticamente ativa

q_S – Umidade específica da superfície

R – Coeficiente de correlação

R² – Coeficiente de determinação

R_a – Respiração autotrófica

r_{ah} – Resistência aerodinâmica para o calor

r_{aw} – Resistência aerodinâmica para o vapor d'água

R_d – Respiração noturna

R_h – Respiração heterotrófica

R_n – Saldo de Radiação

RS – Estado do Rio Grande do Sul

T_{Base} – Temperatura de base da cultura

T_g – Temperatura do solo

T_{Média} – Temperatura média diária

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

V_m – Capacidade máxima da enzima Rubisco

Γ* - Ponto de compensação para a assimilação de CO₂ bruta

ρ_{atm} - Densidade do ar úmido

θ_{atm} - Temperatura potencial da atmosfera

θ_s - Temperatura potencial da superfície

∇H - Gradiente de potencial hidráulico

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

VALIDAÇÃO DO MODELO Agro-IBIS PARA UM SÍTIO EXPERIMENTAL DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: GEOVANE WEBLER

ORIENTADORA: DÉBORA REGINA ROBERTI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 24 de Março de 2011.

O modelo Agro-IBIS é validado para um sítio experimental com o cultivo de soja no estado do Rio Grande do Sul. No sítio é conduzido um experimento que tem como objetivo avaliar o impacto dos diferentes sistemas de manejo do solo em diversas áreas do conhecimento. No sítio foram coletadas medidas micrometeorológicas das transferências de energia, massa e água entre o ecossistema da soja e a atmosfera durante o ciclo 2009/2010 da soja. O monitoramento se deu sobre dois sistemas de manejo: (i) o sistema de plantio direto (SD); (ii) sistema de plantio convencional (SC). As simulações com modelo Agro-IBIS para a soja foram realizadas com o modelo sendo forçado com dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os resultados do modelo foram comparados com os dados observados nos SD e SC a fim de avaliar a capacidade do modelo em simular a interação do ecossistema da soja com o ambiente e, também, com o intuito de verificar os efeitos da cobertura da superfície pelos resíduos culturais no SD. Como o modelo não possui a representação dos resíduos culturais, ou seja, do SD, é esperado que seus efeitos não sejam perceptíveis nos resultados simulados. Os resultados indicam que o modelo simula o balanço radiativo e os fluxos de energia de forma consistente. Além disso, a umidade do solo nas camadas 0-20cm, 20-50cm e a integração 0-50 cm, assim como a temperatura do solo a 2cm são simuladas de forma robusta. Na umidade do solo, os resultados simulados melhor representam os dos dados observados no SC, indicando que o efeito da cobertura do solo pelos resíduos culturais não é considerado. Nas variáveis relacionadas ao CO₂, é possível verificar que o modelo tem problemas em relação à simulação da respiração do ecossistema, que é fortemente subestimada. Isso leva a uma inconsistência na simulação das demais variáveis relacionadas ao CO₂, principalmente àquelas que consideram os dados noturnos, já que à noite a troca líquida de CO₂ (NEE) do ecossistema é a respiração do mesmo. Quando a análise dos resultados relacionados ao CO₂ é restrita aos dados diurnos o modelo tem bom desempenho, exceto no período de senescência foliar, quando o modelo segue indicando absorção de CO₂ pelo ecossistema e os dados experimentais indicam emissão.

Palavras-chave: Validação, Agro-IBIS, Soja, Agroecossistema

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

Agro-IBIS MODEL VALIDATION AT A SOYBEAN EXPERIMENTAL SITE IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: GEOVANE WEBLER

ADVISER: DÉBORA REGINA ROBERTI

Place and Date of Defense: Santa Maria, 24 de Março de 2011.

The Agro-IBIS model is validated for a soybean experimental site in the state of Rio Grande do Sul. This experiment is conducted in order to evaluate the impact of different soil management systems on different areas of science. In the site, we obtained micrometeorological measures of energy, mass and water exchanges between the soybean ecosystem and the environment during the 2009/2010 soybean growing season. We used two management systems: (1) no-tillage system (NT) and (2) conventional tillage system (CT). The model was forced with meteorological data from the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET). The results of the model were compared with the observed data in order to evaluate the capacity of the model in simulating the interaction of the soybean ecosystem with environment and also to verify the effects of surface coverage by crop residues in NT. Since the model does not have the representation of crop residues, i.e., of NT, its effects are not expected in the simulation results. The results indicate that the model simulates the radiative balance and flows of energy in a satisfactory way. Besides this, soil moisture in the 0-20 cm and 20-50 cm layers and the 0-50 cm integration as well as soil temperature at 2 cm are simulated in a suitable way. For soil moisture, the simulated results represent better the observed data in CT, indicating that the effect of soil coverage by crop residues is not simulated. In the variables related to CO₂, the model has problems concerning the simulation of the ecosystem respiration, which is strongly underestimated. This leads to an inconsistency in the simulation of the others variable related to CO₂, mainly of those which consider the night-time data, since at night the net CO₂ exchange of the ecosystem (NEE) is the respiration. For the daytime CO₂ the model shows good performance, except in the period of leaf senescence, when the model indicates CO₂ uptake by the ecosystem and the experimental data indicate emission.

Keywords: Validation; Agro-IBIS model; Soybean; Agroecosystem.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 METODOLOGIA.....	17
2.1 Modelo Agro-Ibis	17
2.2 Fisiologia Vegetal e condutância estomática.....	18
2.3 Balanço de Energia.....	20
2.3.1 Balanço de Energia no modelo.....	22
2.4 Balanço de CO ₂	23
2.4.1 CO ₂ no modelo	24
2.5 Índice de Área Foliar	25
2.6 Evapotranspiração	25
2.7 Propriedades físicas e umidade do solo.....	27
2.8 Sistemas de Plantio e Resíduos Culturais.....	27
2.9 Sítio Experimental de Cruz Alta – RS.....	30
2.10 Dados Experimentais.....	32
2.10.1 Descrição dos Dados	32
2.11 Processo de modelagem.....	34
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1 Condições meteorológicas.....	35
3.2 Balanço de Energia observado	36
3.3 Índice de Área Foliar	37
3.4 Balanço de Energia.....	40
3.5 Temperatura do Solo	43
3.6 Umidade do Solo	44
3.7 Balanço de CO ₂	46
3.7.1 CO ₂ Diurno	46
3.7.2 CO ₂ Noturno	48
3.7.3 CO ₂ Diário	49
3.8 Evapotranspiração	51
4 CONCLUSÕES	53
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Em escala global a substituição da vegetação natural por agricultura tem ocasionado impactos significativos em mecanismos que influenciam no clima. Em geral, em comparação com as florestas, as terras utilizadas em cultivos agrícolas se caracterizam por um albedo maior, menor rugosidade superficial e variações de umidade do solo que influenciam os fluxos de calor sensível e latente. O uso da terra em pastagem e o desmatamento contribuem para a ocorrência de menores índices pluviométricos (Bonan, 2002). Técnicas de manejo empregadas nas culturas também podem influenciar o clima em escala local e regional. A irrigação contribui para o aumento da umidade relativa do ar, a densidade das nuvens e precipitação. Além disso, as culturas agrícolas constituem uma das mais importantes fonte de dióxido de carbono (CO₂) da biosfera (Smith et al, 2007; Mosier et al, 1998; Pattey et al, 2007), resultado da respiração das plantas e decomposição da matéria orgânica do solo.

Com o aumento mundial da demanda por produtos agrícolas para a produção de alimentos e bioenergia é necessário um constante crescimento da produção, que reflete não somente na expansão da área cultivada, mas também na adoção de técnicas de cultivo que aumentem a produção e minimizem os custos. Esta combinação acaba gerando impactos ambientais que precisam ser conhecidos para que possam ser de alguma forma minimizados ou, de preferência, evitados.

Mudanças nas práticas agrícolas estão sendo consideradas como possíveis formas de intervir nas mudanças climáticas, como por exemplo, aumentando o armazenamento de carbono no solo em áreas agrícolas (Vleeshouwers e Verhagen, 2002; Freibauer et al, 2004; Smith, 2004, Aubinet, 2009). O carbono orgânico dos ecossistemas agrícolas depende do uso da terra, cultivares produzidos, aplicação de fertilizantes, gestão de resíduos culturais, microclima e manejo do solo (IPCC, 1997).

O aumento do interesse no comportamento de culturas agrícolas tem incentivado o desenvolvimento de estudos experimentais sobre o comportamento dos fluxos de energia, carbono e água em culturas agrícolas cultivadas sob diferentes sistemas de manejo. Um dos principais métodos de obtenção de tais fluxos é o método da covariância de vórtices turbulentos. Isso inclui a compreensão dos impactos causados pela irrigação, rotações de cultura e sistemas de manejo do solo. Alguns exemplos de culturas estudadas a partir do método de covariância dos vórtices são: trigo por Gilmanov et al. (2003), Anthoni et al. (2004a) e Moureaux et al. (2008) ; trigo e cevada por Soegaard et al. (2003); beterraba por

Moureaux et al. (2006); arroz por Saito et al. (2005), e para rotações entre as culturas de soja e milho por Verma et al. (2005), Hollinger et al. (2005), Suyker et al. (2005) e Roberti et al. (2011). É importante salientar que Verma et al. (2005) conclui que a rotação de culturas atua de forma neutra nas emissões de carbono e Hollinger et al. (2005) conclui que o manejo do solo com a rotação de culturas foi sumidouro de uma pequena quantidade de carbono (Hollinger et al. 2006a), gerando um debate em relação a sua significância (Dobermann et al. 2006, Hollinger et al. 2006b). Desta forma Hollinger et al. (2006b), enfatiza a necessidade de pesquisas adicionais no tema sequestro de carbono para diferentes tipos de clima e condições do solo.

O método da covariância dos vórtices turbulentos exige um aparato experimental de alto custo, se tornando viável apenas para medidas em poucos sítios. Por isso, as medidas experimentais das trocas de carbono em agroecossistemas têm sido usadas como base para o desenvolvimento e validação de modelos de interação biosfera-atmosfera, além de produtos derivados de medidas de satélites, possibilitando o monitoramento da fenologia e da produção primária líquida e bruta em grande escala (Suyker et al. 2005). A modelagem da interação biosfera-atmosfera é uma ferramenta importante pela dificuldade em medir as transferências de energia, água e CO₂ em grande escala. Assim, é possível simular os impactos dos diversos ecossistemas no clima em escala global, regional ou pontual. Por outro lado, a modelagem também é uma forma de projetar ou estimar os impactos de eventuais mudanças climáticas ou do uso do solo no desenvolvimento dos ecossistemas.

Nos últimos anos foram desenvolvidos diversos trabalhos para adaptar modelos que descrevem a interação biosfera-atmosfera para simular diferentes ecossistemas agrícolas. Entre estes trabalhos podemos citar Hanan et al. (2005) que adaptaram o modelo SiB2 (Simple Biosphere Model, Sellers et al. 1996c) para simulação do ecossistema do trigo, Lokupitiya et al. (2009) que a partir do modelo Sib estruturaram o Sibcrop, que contém a representação das culturas da soja, milho e trigo. O modelo IBIS (Integrated Biosphere Simulator, Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000) foi adaptado e utilizado em diversos trabalhos. Como exemplos: para a simulação da cultura do milho (Kucharik e Brye, 2003) e (Kucharik, 2003), rotação soja-milho sob diversos sistemas de manejo (Kucharik e Twine, 2007) e cana de açúcar (Cuadra et al. 2010). Nesses modelos foram acrescentadas parametrizações específicas para simular os processos fenológicos e fisiológicos das culturas agrícolas.

Kucharik e Twine (2007) avaliaram o modelo Agro-IBIS para as culturas de soja e milho. Os dados experimentais foram obtidos em um sítio experimental localizado no

Nebraska, região central dos EUA. Os resultados obtidos nesse estudo indicam que o modelo é capaz de simular os principais processos relacionados ao desenvolvimento dessas culturas agrícolas de forma consistente.

Apesar das validações da cultura da soja (representada no Agro-IBIS) para as condições Norte-americanas, mudanças nas condições do solo, clima e características das variedades cultivadas em outras partes do mundo podem alterar significativamente os parâmetros considerados no modelo e, por consequência, os resultados das simulações. No estado do Rio Grande do Sul o planalto médio, região com predominância de solos do tipo Latossolos, é a principal região produtora de soja (Cunha et al., 2001). É nessa região que se localiza o sítio experimental analisado neste estudo.

Com isso, o objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da validação do modelo Agro-IBIS para a cultura da soja em uma área experimental no município de Cruz Alta cultivada em dois sistemas de manejo do solo: (i) o sistema de Plantio Direto (SD) e (ii) o Sistema de Plantio Convencional (SC). Com isso pretende-se responder as seguintes questões: (i) Pode um modelo escrito e calibrado para as condições Norte-americanas ser usado para representar a soja no Brasil? (ii) Quais processos estão representados de forma satisfatória? (iii) O modelo consegue reproduzir as mudanças nos processos simulados durante os diversos estágios de desenvolvimento das plantas? (iv) O que precisa ser modificado no modelo a fim de obter melhores resultados?

Segundo Rykiel Jr. (1996), validação é a demonstração de que um modelo, dentro do seu domínio de aplicabilidade, possui um espectro satisfatório de precisão, compatível com a aplicação prevista para o modelo. Devemos constatar que esta demonstração indica que o modelo é aceitável para uso, o que não quer dizer de forma nenhuma que ele contenha alguma verdade absoluta, nem mesmo que seja o melhor modelo disponível. Colocado em termos operacionais, esta demonstração envolve a comparação dos dados modelados com aqueles obtidos pela observação ou medidas no sistema real.

Assim, não se pretende comprovar que o modelo usado neste trabalho é melhor em relação a outros disponíveis. Aqui se buscou, principalmente, compreender e avaliar os processos que são simulados pelo Agro-IBIS. Isso será feito através da validação, comparando os dados observados com os resultados obtidos com o modelo. Com isso foi possível ter uma ideia clara de quais processos estão sendo bem representados no modelo, além de identificar as parametrizações que estão com problemas ou precisam ser inseridas para que se tenha uma ferramenta de modelagem mais robusta.

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos: O capítulo 1 está aqui representado. O capítulo 2 apresenta a metodologia adotada neste trabalho, além da descrição do sítio experimental, do modelo Agro-IBIS e dos dados utilizados. No capítulo 3 serão apresentadas as condições meteorológicas sob as quais a cultura se desenvolveu. Além disso, são mostrados e discutidos os resultados obtidos a partir do processo de validação do modelo contra os dados observados no sítio de Cruz Alta. No capítulo 4 estão as conclusões obtidas ao longo da realização deste trabalho. O quinto capítulo contém a listagem das referências bibliográficas que serviram como base teórica para o trabalho.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelo Agro-Ibis

A versão 2 do IBIS (Integrated Biosphere Simulator) forneceu a estrutura para o desenvolvimento do modelo para culturas agrícolas, o Agro-IBIS. O modelo IBIS inclui, em uma única estrutura para modelagem de ecossistemas naturais, as representações da superfície terrestre, processos relacionados a energia, água, solo e atmosfera. Além disso a fisiologia do dossel (fotossíntese e condutância estomática), fenologia, dinâmica da vegetação (alocação de carbono, competição entre plantas), e balanço de carbono terrestre (produção primária líquida, alocação de carbono nas plantas, carbono no solo e decomposição da matéria orgânica) estão também representados (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000; Kucharik e Brye, 2003).

Esses processos são organizados em uma estrutura hierárquica e operam em escalas temporais variando entre uma hora a um ano. Esta abordagem permite o acoplamento entre os processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em escalas de tempo diferentes. Tal estrutura de modelagem foi adaptada e modificada a fim de atingir a capacidade de simular culturas agrícolas. A figura 1 mostra a estrutura do modelo IBIS, adaptado para ecossistemas agrícolas. A saída do modelo inclui a produtividade da cultura, produção de matéria seca (folhas, caule, raízes e grãos), índice de área foliar (IAF) diário, crescimento radicular da planta, variáveis relacionadas aos ciclos de carbono e nitrogênio, evapotranspiração, e fluxo de CO₂ do solo (Kucharik e Brye, 2003).

Atualmente estão implementadas as culturas de soja, milho, trigo e cana de açúcar. Para cada uma dessas culturas o Agro-IBIS resolve um conjunto de equações para representar os processos físicos e biofísicos a fim de simular o balanço de energia, água e massa dos ecossistemas agrícolas.

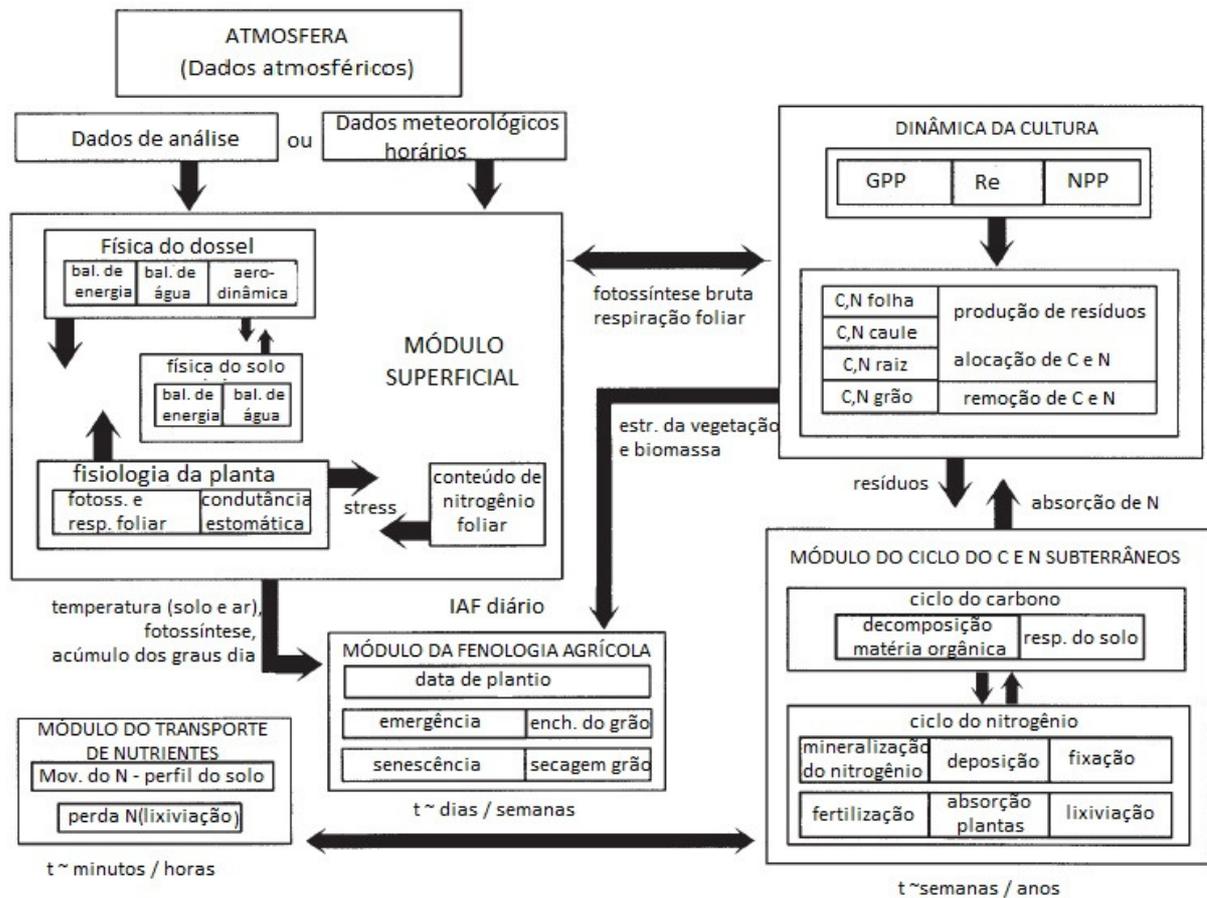


Figura 1 – Esquema do modelo dinâmico de agroecossistemas Agro-IBIS. Adaptado de Kucharik e Brye (2003).

A seguir será apresentada uma descrição dos principais processos e das equações utilizadas no modelo para calcular as variáveis simuladas pelo Agro-IBIS que serão analisadas ao longo deste trabalho.

2.2 Fisiologia Vegetal e condutância estomática

No Agro-IBIS as transferências de vapor de água e dióxido de carbono entre a vegetação e a atmosfera são controladas pelos processos fisiológicos que governam a fotossíntese e a condutância estomática. O modelo usa as equações de Farquhar (Farquhar et al., 1980; Farquhar e Sharkey, 1982; Collatz et al. 1991) para o modelo da fotossíntese. As equações apresentadas por Ball et al. (1986) são utilizadas na representação da condutância

estomática do modelo. Nessas formulações a fotossíntese é função da luz absorvida, temperatura da folha, concentração de CO_2 na folha e a capacidade da enzima Rubisco. A condutância estomática, por sua vez, é função da taxa fotossintética e das concentrações de CO_2 e vapor d'água, (Foley et al., 1996).

A assimilação de CO_2 na cultura da soja inicia pela ligação da molécula de CO_2 com uma molécula dita aceitadora constituída por cinco átomos de carbono. Carboxilação (fixação de CO_2) é definida, portanto, através de um processo. Como primeiro produto estável, este processo fornece, duas moléculas de três átomos de carbono, chamadas moléculas C_3 . A assimilação fotossintética do CO_2 feita dessa desta forma recebe o nome de fotossíntese em C_3 (Gomes e Varriale, 2001). A soja, por assimilar o CO_2 atmosférico por esse mecanismo é classificada como planta C_3 .

Nas equações de Farquhar a fotossíntese é representada como o mínimo de três potenciais. A taxa de fotossíntese bruta A_g ($mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$) por unidade de área foliar pode ser expressa por

$$A_g \approx \min(J_e, J_c, J_s) \quad (1)$$

em que J_e e J_c são as taxas de assimilação de CO_2 limitadas pela luz e pela enzima Rubisco, responsável pela fixação do CO_2 , respectivamente. J_s é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela alta concentração intercelular de CO_2 e elevada irradiância.

A limitação da fotossíntese pela luz é dada por:

$$J_e = \alpha_3 Q_p \cdot \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + 2\Gamma^*} \quad (2)$$

em que Q_p é a radiação fotossinteticamente ativa, α_3 é a eficiência quântica da planta C_3 para absorção de CO_2 , C_i é a concentração intercelular de CO_2 , Γ^* é o ponto de compensação para a assimilação bruta de CO_2 .

A limitação da assimilação de CO_2 pela enzima Rubisco (J_c) é dada pela equação (3), onde V_m é a capacidade máxima da enzima Rubisco, O_2 é a concentração de oxigênio na atmosfera. K_o e K_c são os coeficientes de Michaelis-Menten para O_2 e CO_2 , respectivamente.

$$J_c = \frac{V_m(c_i - \Gamma^*)}{c_i + K_c \left(1 + \frac{[O_2]}{K_0}\right)} \quad (3)$$

A condutância estomática (g_s), equação (4), é simulada como uma função da assimilação líquida de CO₂ (A_n), da concentração de CO₂ na camada limite foliar (C_s) e da umidade relativa do ar (h_a), conforme a equação:

$$g_s = m \frac{A_n h_a}{C_s} + b \quad (4)$$

onde, m é o coeficiente relacionado à condutância estomática e b é o intercepto da relação linear. A equação 4 demonstra que os processos de fotossíntese e condutância estomatal estão relacionados, pois o modelo da fotossíntese determina o valor de (A_n). A pressão de vapor, temperatura foliar e taxa de transpiração determinam o valor da umidade relativa (h_a), e, finalmente, a concentração de CO₂ no ambiente, a taxa de assimilação e condutância da camada limite são usadas na determinação da (C_s).

2.3 Balanço de Energia

O balanço de energia na superfície pode ser representado pela transferência de energia na forma de calor para aquecer a atmosfera (calor sensível) e evaporar a água (calor latente) e pela transferência por condução para aquecer o solo (fluxo de calor no solo). O balanço de energia de uma superfície pode ser expresso como:

$$Rn - G = H + LE \quad (5)$$

onde, Rn é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo, H o calor sensível e LE o calor latente. Os termos do lado esquerdo e direito da equação (5) são definidos como energia disponível ($Rn - G$) e fluxos turbulentos ($H + LE$), respectivamente. Como convenção de sinal, H , LE e G são positivos quando transportados para fora da superfície, enquanto Rn é negativo nesta situação.

Os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) são processos convectivos e turbulentos. Essa denominação se justifica, pois a maior temperatura da superfície do solo em relação à atmosfera provoca convecção, fazendo com que a energia e a umidade que se concentram próximas à superfície sejam transportadas para maiores alturas. Além disso, a atmosfera é constantemente agitada pelo vento gerado por gradientes de pressão e movimentos em torno das rugosidades da superfície. Este processo força o ar aquecido e a umidade que estão próximos ao solo a se misturar ao ar acima e assim acaba por aquecer e umidificar os níveis superiores da atmosfera.

A transferência de energia entre a superfície e a atmosfera pode ser vista como um análogo simples do fluxo de corrente elétrica em um circuito elétrico. A corrente elétrica é calculada pela equação:

$$i(\text{corrente}) = \frac{\text{Diferença de potencial}}{\text{resistência}} \quad (6)$$

Analogamente, para a atmosfera, a equação pode ser escrita na forma:

$$\text{Fluxo} = \frac{\text{Diferença na concentração}}{\text{resistência ao fluxo}} \quad (7)$$

A transferência de energia da superfície para as camadas mais profundas do solo se dá por condução. Esse processo ocorre com a transferência de energia cinética de uma molécula para uma outra adjacente. Gases como o ar, tem baixa condutividade térmica e, por isso, a atmosfera é um mau condutor de calor. Apesar de a condução poder ser desprezada nos níveis mais elevados da atmosfera, ela é o principal mecanismo pelo qual o calor é transferido da superfície quente para as camadas subjacentes do solo.

2.3.1 Balanço de Energia no modelo

A analogia proposta na equação (7) é usada no modelo Agro-IBIS para determinar a intensidade dos fluxos de calor sensível e latente da superfície para a atmosfera. H e LE são calculados pelas seguintes equações:

$$H = -\rho_{atm} C_p \frac{(\theta_{atm} - \theta_s)}{r_{ah}} \quad (8)$$

$$LE = -\rho_{atm} \frac{(q_{atm} - q_s)}{r_{aw}} \quad (9)$$

onde, ρ_{atm} é a densidade do ar úmido dada em $\frac{Kg}{m^3}$. C_p é a capacidade térmica do ar $\left(\frac{J}{Kg K}\right)$. θ_{atm} e θ_s são as temperaturas potenciais da atmosfera e da superfície, respectivamente, dadas em (K) . q_{atm} e q_s são as umidades específicas na atmosfera e superfície, respectivamente, ambas dadas em $\frac{Kg}{Kg}$.

As resistências aerodinâmicas para o calor (r_{ah}) e para o vapor d'água (r_{aw}) utilizadas nas equações (8) e (9) dependem de diversas condições atmosféricas e as equações para os cálculos são descritas em Bonan (1996). O fluxo de calor no solo (G), em $\frac{W}{m^2}$, é calculado pela equação (10) em que K_n e T_g são a condutividade térmica e a temperatura do solo, respectivamente. T_n é a temperatura na base da camada de espessura ΔZ_n . O sub-índice n indica o número da camada. O número 2 indica que o fluxo está sendo calculado na profundidade $\frac{\Delta Z_n}{2}$.

$$G = \frac{2k_n}{\Delta Z_n} (T_g - T_n) \quad (10)$$

2.4 Balanço de CO₂

A Produção Primária Bruta (GPP), equação (11), de um ecossistema representa a absorção de CO₂ durante a fotossíntese (Ciais et al., 2010).

$$GPP = NEE - Rd \quad (11)$$

em que NEE é a troca líquida de CO₂ pelo ecossistema e Rd é a respiração noturna que é extrapolada para o dia todo.

Aproximadamente metade da GPP é consumida na respiração autotrófica das plantas (Ra), que está relacionada com a alocação de carbono formando novos tecidos e na manutenção dos já existentes. A parcela da GPP não utilizada na respiração, portanto disponível para outros processos, é definida como Produção Primária Líquida (NPP) e se relaciona com Ra e GPP por:

$$GPP = NPP + Ra \quad (12)$$

Embora a maior parte da NPP seja alocada em forma de biomassa nas diversas partes da planta (raízes, folhas, caule, vagens e grãos), há uma pequena fração de difícil estimativa que é consumida por diferentes processos que não serão avaliados neste trabalho.

Os vegetais são os principais responsáveis pela adição ao solo de compostos orgânicos primários sintetizados no processo de fotossíntese, utilizando energia solar, CO₂ do ar, água e nutrientes do solo (Lovato et al., 2004). Com isso, ao longo do tempo são formados reservatórios de carbono no solo, processo que ocorre a partir do depósito de matéria orgânica através da decomposição das raízes, queda das folhas, galhos e demais resíduos da planta. Os organismos, com destaque aos microrganismos heterotróficos que realizam a respiração heterotrófica (Rh) liberando CO₂ para atmosfera, obtêm energia para o seu desenvolvimento pela decomposição de resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo, nutrientes, e uma gama de compostos orgânicos secundários oriundos do metabolismo microbiano, os quais passam a compor a matéria orgânica do solo (Vezzani, 2001; Lovato et al., 2004).

Os processos que contribuem para o cômputo da Rh incluem a decomposição da matéria orgânica depositada no solo nos ciclos das culturas cultivadas recentemente, mas, também, contém a decomposição da matéria orgânica acumulada no ecossistema durante décadas, séculos ou até milênios (Smith et al., 2010). Esses reservatórios de carbono têm diferentes períodos de residência (Zimmermann et al., 2007), e, dessa forma, é difícil quantificar a matéria orgânica contida no ecossistema e, por consequência, Rh .

A diferença entre NPP e Rh é denominada Produtividade Líquida do Ecossistema (NEP):

$$NEP = NPP - Rh \quad (13)$$

Da equação 11, tem-se que:

$$NPP = GPP - Ra \quad (14)$$

A soma de Ra e Rh representa a respiração total do ecossistema (Re). Assim, de (12) e (13) obtém-se que:

$$NEP = GPP - Rh - Ra$$

$$NEP = GPP - Re \quad (15)$$

NEP é o carbono alocado no ecossistema ao final dos processos de fotossíntese e respiração. Isso inclui a parcela alocada nas diversas partes das plantas e também no solo através da deposição dos diversos resíduos das culturas. É ele que indica se o ecossistema é fonte ou sumidouro de carbono.

2.4.1 CO₂ no modelo

A emergência, fenologia e os estágios de desenvolvimento da planta são determinados pelo crescimento baseado em graus-dia de desenvolvimento (GDD), de acordo com a equação 16.

$$GDD = \sum(T_{Média} - T_{Base}) \quad (16)$$

onde, GDD são os graus-dia acumulados, $T_{Média}$ é a temperatura média diária e T_{Base} é a temperatura de base (10 °C para a soja). A quantidade de GDD necessários para a cultura atingir a maturação fisiológica é um parâmetro de entrada do modelo.

O modelo aloca o carbono resultante da fotossíntese em quatro reservatórios: raiz, caule, folhas e grãos. As proporções variam ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta, de acordo com o estágio fenológico no qual a cultura se encontra. A alocação de carbono diária nas folhas é usada para calcular o IAF, conforme descrito na próxima seção.

2.5 Índice de Área Foliar

O Índice de Área Foliar (IAF) é umas das principais características biofísicas dos ecossistemas. Ele influi em muitos processos, entre eles o balanço de energia e a capacidade fotossintética. Assim, se torna uma variável importante para caracterizar um ecossistema e permitir que se estime sua influência no ambiente.

No modelo Agro-IBIS, o IAF é calculado a partir da área foliar específica da cultura. Esse parâmetro é específico para cada cultura e se refere à área de folha por quilograma de carbono $\left(\frac{m^2}{Kg C}\right)$. Essa constante é multiplicada pela quantidade de carbono alocada por unidade de área da folha $\left(\frac{Kg C}{m^2}\right)$, resultando assim no IAF da cultura em escala de tempo diária. A partição da matéria seca assimilada para vários sumidouros de carbono (folha, caule, raiz, grão) muda de acordo com o estágio fenológico do cultivo, fazendo com que se tenha uma simulação consistente em relação com os processos que ocorrem na natureza.

2.6 Evapotranspiração

O termo evapotranspiração refere-se à incidência simultânea dos processos de evaporação e de transpiração nos ecossistemas. Ela depende principalmente da energia disponível, do déficit de pressão de vapor, da capacidade de transporte do vapor d'água pela turbulência gerada pelo vento e do suprimento de água no solo, além de fatores fisiológicos da planta.

Os processos de medida da evapotranspiração são bastante complexos. Isso se deve principalmente à difícil diferenciação dos processos de evaporação e transpiração (Allen et al., 1998). Em uma área agrícola, por exemplo, a evolução no crescimento da cultura determina qual processo contribuirá mais representativamente para a evapotranspiração. Quando da semeadura da cultura, a fração de radiação que chega ao solo é alta, logo a água perdida através da evaporação do solo governa a evapotranspiração. À medida que a cultura se desenvolve, sua área de dossel aumenta e, conseqüentemente, a fração de radiação que chega ao solo diminui. Com isso, a transpiração passa a ser determinante no cômputo da evapotranspiração.

Utilizando o IAF como uma representação do dossel da vegetação, a figura 2 ilustra o comportamento dos processos de evaporação e transpiração em relação à evapotranspiração relativa (%) durante o ciclo da cultura. Com a análise da figura observa-se que quando ocorre a semeadura o IAF é nulo, e com isso toda evapotranspiração é atribuída à evaporação do solo. À medida que a cultura vai cumprindo seu ciclo a planta cresce, e conseqüentemente o IAF aumenta, reduzindo a fração de radiação que chega ao solo e aumentando a contribuição da transpiração para a evapotranspiração, podendo chegar a uma proporção de 90%.

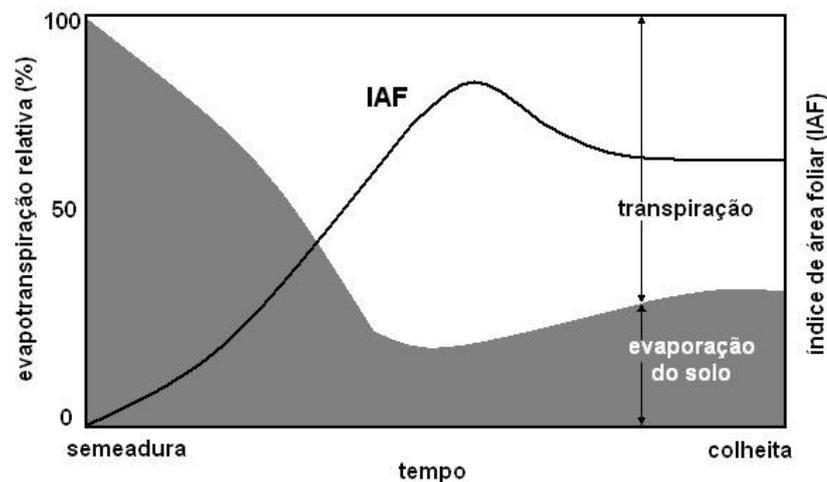


Figura 2 - Relação entre evapotranspiração relativa (%) e o período de crescimento da planta. Adaptado de Allen et al. (1998)

A taxa de evapotranspiração é controlada principalmente pelas condições atmosféricas locais, energia disponível, disponibilidade hídrica, e pelos fatores biológicos da planta (Suyker e Verma, 2008). Suyker (2009), conclui que para a soja o saldo de radiação (R_n) é responsável por 75% da variabilidade da ET.

No modelo Agro-IBIS a evapotranspiração total é dada pela soma dos três fluxos de vapor d'água: a evaporação da água da superfície do solo, a evaporação da água interceptada pelo dossel e a água resultante da transpiração do dossel.

2.7 Propriedades físicas e umidade do solo

O módulo de física do solo do modelo Agro-IBIS calcula a taxa de variação da umidade do solo com o tempo, com base na Equação de Darcy (Equação 16) e no princípio da conservação de massa, para calcular o fluxo vertical de água no solo (Campbell e Norman, 1997). Os processos mais influentes para determinar o balanço hídrico do solo são: a infiltração de água, a redistribuição da água no perfil do solo, a evaporação da água da superfície do solo e a transpiração de água pelas plantas.

$$q = -k.\nabla H \quad (16)$$

onde q é a densidade de fluxo de água ($L.m^{-2}.dia^{-1}$), ∇H o gradiente de potencial hidráulico ($m.m^{-1}$) e K a condutividade hidráulica do solo ($mm.dia^{-1}$).

As simulações foram integradas com onze camadas de solo (sucessivamente 05, 05, 10, 10, 10, 20, 20, 20, 50, 50, 50cm) atingindo assim 2,5 metros de profundidade. Especificamente para este trabalho, a análise do conteúdo de água no solo foi feita para 3 camadas: (i) 0-20cm, (ii) 20-30cm e (iii) 0-50cm. As medidas para essas camadas foram obtidas experimentalmente e serão comparadas aos resultados do modelo.

2.8 Sistemas de Plantio e Resíduos Culturais

Os sistemas de plantio direto (SD) e convencional (SC) se diferenciam principalmente pelo fato de no primeiro não haver revolvimento do solo antes da semeadura das culturas. No sítio de Cruz Alta, por exemplo, na parcela onde este sistema de plantio está em curso, o solo não é revolvido desde 1986. Com isso 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. A presença dos resíduos sobre a superfície forma uma camada que interfere em muitos aspectos, principalmente na preservação da umidade do solo, alteração no albedo superficial e diminuição da temperatura do solo. Em relação à umidade do solo, Tormena et.al (2002) e Klein e Libardi (2002) compararam o SD e SC para diferentes tipos de solo e culturas identificando propriedades favoráveis ao aumento no armazenamento de água no SD. Além disso, estudos indicam que a gestão de resíduos da superfície em sistemas agrícolas pode auxiliar na conservação da umidade do solo, reduzindo a evapotranspiração e temperatura do solo em até 10 °C, devido ,principalmente, a um maior albedo de superfície (KuchariK, 2007).



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 sistema de plantio convencional (SC) é caracterizado pelo revolvimento do solo antes da implementação das culturas. Isso é feito, na maioria das vezes, pelos processos de aração e gradagem. Assim sendo, os resíduos culturais são incorporados ao solo mecanicamente, não restando nenhuma camada de resíduos sobre a superfície, (Figura 4), facilitando a degradação dos mesmos pelos microorganismos.

Os resíduos vegetais são a principal fonte de carbono para o solo, obtido pela transformação do CO₂ da atmosfera em substâncias orgânicas no processo de fotossíntese. As transformações biológicas destas substâncias orgânicas, adicionadas ao solo, geram a matéria orgânica do solo. Desta forma, avaliar a adição de resíduos culturais por diferentes sistemas de culturas inseridas em sistemas de preparo do solo e, conseqüentemente a entrada de carbono no solo, torna-se importante.



Figura 4 - Cultivo da soja no sistema de plantio convencional (SC) em Cruz Alta. Na figura, observa-se a ausência dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície.

O modelo Agro-IBIS não possui em seu código a representação dos resíduos culturais (Palhada). Assim, todos os resultados simulados apresentados neste trabalho são para a condição de plantio convencional. Estes resultados serão comparados com os dados

observados em SD e SC, para uma avaliação dos diferentes manejos do solo em relação ao modelo.

2.9 Sítio Experimental de Cruz Alta – RS

O experimento usado para este trabalho foi realizado em uma área experimental agrícola localizada na Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriço (FUNDACEP), em Cruz Alta - RS (28°36'S, 53°40'O), figura 5. Como pode ser observado na figura, as parcelas estão bastante próximas e ao longo dos anos elas possuem o mesmo histórico de cultivares em rotação intensiva de culturas de verão e de inverno.

Na FUNDACEP vem sendo conduzido um experimento de longa duração avaliando dois sistemas de manejo do solo desde 1985. No sistema de plantio direto, desde Novembro de 2008 o Laboratório de Micrometeorologia da UFSM tem monitorado as trocas de energia, água e CO₂ através de uma torre micrometeorológica pertencente ao projeto SULFLUX (www.ufsm.br/sulflux). Em Novembro de 2009, outra torre foi instalada no SC.

Os seguintes sensores, (altura de instalação e modelo) estão instalados na parcela cultivada no SD: pressão (2,5 m; LiCor - LI7500); Temperatura do ar (2,5 m; Campbell Scientific - CSAT 3); Componentes do vento (2,5m; Campbell Scientific - CSAT 3)*; Radiação de onda curta incidente (5 m; Kipp & Zonen - CMB6); Saldo de radiação (5 m; Kipp & Zonen - NR LITE); Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (1 m; Kipp & Zonen - PAR LITE); H₂O/CO₂ (2,5 m; LiCor- LI7500)*; Fluxo de calor no solo (-2 cm; Hukseflux - HFP01SC-L) ; Temperatura do solo (-2 cm; Campbell Scientific - Termopar Tipo E – TCAV-L) ; Umidade do solo (-0,20 m e -20,50cm; Campbell Scientific - CS616-L Water Content Reflectometer)* e precipitação (1,5 m; Texas Instruments, INC). A aproximadamente 200m da torre micrometeorológica existe uma estação meteorológica automática do INMET, que forneceu os dados utilizados como entrada do modelo Agro-IBIS. Os sensores assinalados com (*), estão instalados também sobre a parcela cultivada no SC.

A cultivar de soja utilizada foi a Fundacep 53RR de ciclo precoce. Os estágios fenológicos da soja foram determinados através da escala fenológica proposta por Fehr e Caviness (1977), cujas principais etapas são mostradas na figura 6. 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.

O controle de plantas daninhas foi realizado aproximadamente 25 e 40 dias após a semeadura. A adubação e os demais tratos culturais foram realizados segundo as indicações técnicas. A Tabela 1 apresenta informações acerca do uso do solo nas parcelas monitoradas desde a instalação da torre micrometeorológica no SD.

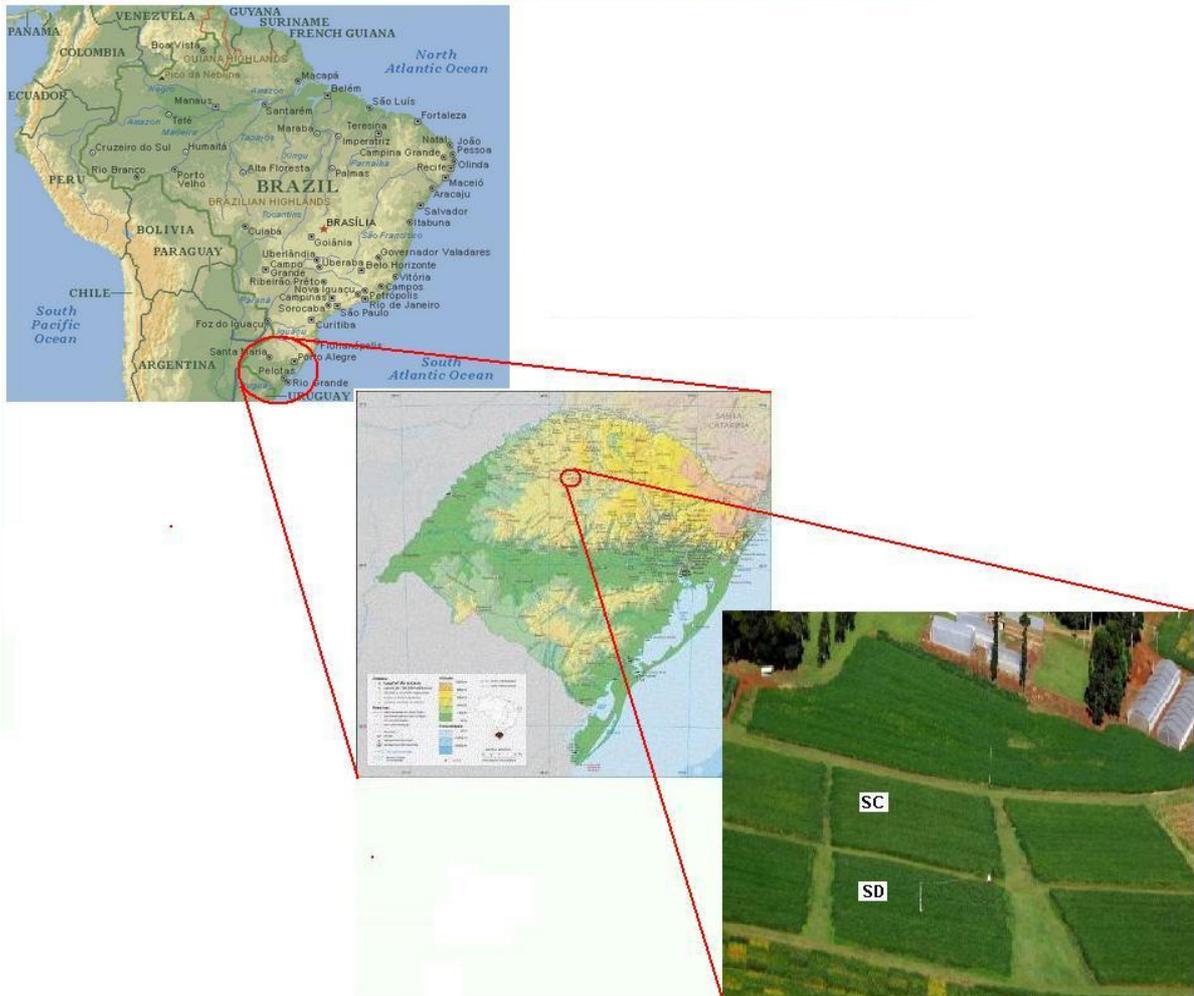


Figura 5 - Localização geográfica e vista aérea do sítio experimental com destaque para as parcelas de sistema de plantio direto (SD) e convencional (SC) em Cruz Alta - RS.

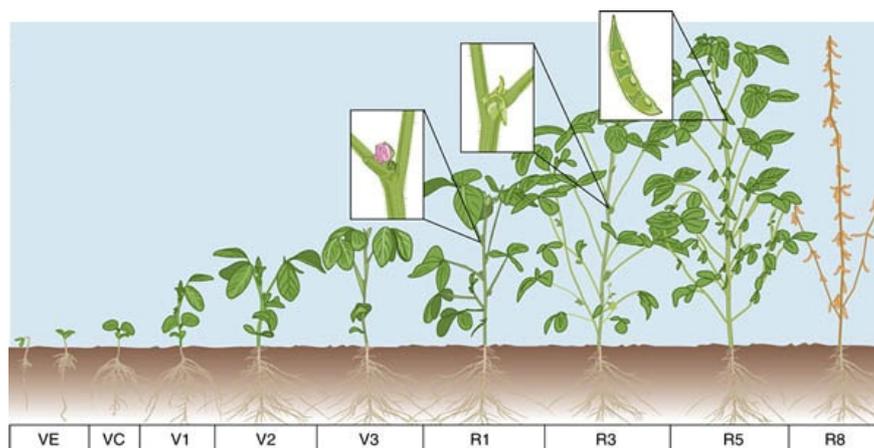


Figura 6 - Estágios fenológicos ao longo do desenvolvimento da cultura da soja. Fonte: Adaptado de University of Illinois Extension (<http://weedsoft.unl.edu/documents/GrowthStagesModule/Crops.htm>).

Tabela 1: Informações sobre o uso do solo nos últimos períodos no sítio experimental de Cruz Alta.

Data	Procedimento
28/11/2008	Semeadura da soja
15/04/2009	Colheita da soja
15/06/2009	Semeadura de aveia preta
06/11/2009	Colheita da aveia preta
14/12/2009	Semeadura da soja (Usada neste trabalho)
28/04/2010	Colheita da soja

2.10 Dados Experimentais

2.10.1 Descrição dos Dados

Os fluxos de calor sensível, latente e de CO₂ foram estimados experimentalmente com períodos de 30min utilizando o Método de Covariância dos Vórtices. Os dados de fluxo foram corrigidos utilizando métodos padrão que incluem a rotação de coordenadas e correções com relação à densidade do ar (Webb et al., 1980; Baldocchi et al., 1988; Aubinet et al., 2000). Os dados experimentais podem apresentar falhas devido a problemas de falta de energia, falha humana ou problemas em sensores. No período utilizado neste trabalho não ocorreram falhas

com período contínuo maior que dois dias. Para o processo de validação essas falhas não foram preenchidas, evitando-se assim que dados advindos de técnicas de preenchimento influenciassem nos resultados do trabalho.

O ciclo da soja no sítio experimental de Cruz Alta iniciou no dia 14 de Dezembro de 2009 com a sementeira e encerrou no dia 13 de Abril com a maturação fisiológica. A colheita ocorreu no dia 28 de Abril de 2010, totalizando 137 dias do plantio à colheita. Normalmente o plantio da soja nessa região ocorre no mês de Novembro, mas devido ao excesso de precipitação neste mês em 2009 o plantio foi atrasado. Na primeira quinzena de Dezembro choveu 151mm. Após a maturação fisiológica também houve uma grande quantidade de precipitação, atrasando em alguns dias a data da colheita.

Durante o monitoramento do ciclo da soja 2009/2010, as medidas do IAF foram feitas aproximadamente a cada quinze dias nos dois sistemas de cultivo. Com isso é possível ter um indicativo do desenvolvimento da cultura em seus diversos estágios fenológicos. Como toda medida experimental, as medidas do IAF podem conter algumas fontes de incerteza. Mesmo assim o IAF é uma informação valiosa que permite comparar o desenvolvimento da cultura em cada sistema de plantio com os valores simulados. Além disso, com essas medidas, é possível verificar a resposta das culturas à fatores como estiagens, ação de ervas daninhas, doenças, pragas, adubação entre outros.

No sítio de Cruz Alta, em cada medida, o IAF foi determinado a partir da coleta de quatro plantas representativas em cada sistema de plantio. As folhas de cada planta foram retiradas e dispostas de forma estendida sobre uma superfície branca de área conhecida e, em seguida, fotografadas. Posteriormente as imagens foram processadas através do programa *Assess 2.0: Image Analysis Software for Plant Disease Quantification*, que reconhece sobre a área da superfície branca a área colorida (folhas) e calcula a porcentagem da área foliar estendida sobre a superfície. Desta forma se obtém a área foliar da amostra, que é representativa de uma superfície de coleta no campo. Através desta relação se obtém o IAF (área foliar por unidade de área de solo).

O solo no sítio experimental em estudo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999; Rhodic Hapludox (FAO)). Ao final do ciclo da soja foi realizada uma análise das propriedades físicas do solo. Como resultado obteve-se as seguintes características: $520 \frac{g}{Kg}$ de argila; $240 \frac{g}{Kg}$ de silte; $240 \frac{g}{Kg}$ de areia.

2.11 Processo de modelagem

Neste trabalho o modelo Agro-IBIS foi integrado a cada 60 minutos, sendo forçado com dados meteorológicos de radiação solar incidente (Wm^{-2}), precipitação (mm), temperatura do ar ($^{\circ}C$), velocidade do vento (ms^{-1}), umidade relativa do ar (%) e pressão atmosférica (mb) obtidos pela estação automática do INMET localizada nas proximidades do sítio. A simulação foi validada contra medidas micro-meteorológicas realizadas sobre a cultura.

As medidas experimentais foram obtidas para dois sistemas de manejo do solo, os sistemas de plantio direto (SD) e convencional (SC). Como mostrado na Tabela 2, algumas variáveis relacionadas ao solo foram obtidas em sítio somente para o SD. Nesses casos o modelo foi avaliado somente para esse sistema de manejo.

Tabela 2: Listagem de variáveis obtidas experimentalmente para cada sistema de manejo do solo. O “x” indica que o dado foi coletado.

Variável	SD	SC
H	X	X
LE	X	X
G	X	
Rn	X	
IAF	X	X
Fluxo de CO ₂	X	X
T _{Solo}	X	
Umidade solo	X	X
ET	X	X

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições meteorológicas

O clima em Cruz Alta-RS é subtropical úmido, Cfa 2, conforme a classificação climática de Köppen. A precipitação média anual é em torno de 1774mm, com chuvas bem distribuídas durante o ano. O mês mais quente do ano é Janeiro, com o máximo normal de 30 °C, e Julho o mês mais frio, com mínima normal de 8,6 ° C. A Tabela 3 apresenta os dados de precipitação climática e acumulada ao longo do ciclo da soja 2009/2010 em Cruz Alta-RS. A precipitação média acumulada para os meses de Dezembro a Abril foi de 695mm, sendo que para o ciclo 2009/2010 o acumulado foi de 758mm, valor acima da média climática. A distribuição da precipitação no ciclo da soja 2009/2010 foi irregular. Os meses de Janeiro e Março apresentam precipitação muito acima/abaixo da média, respectivamente. A figura 7 mostra a temperatura média diária e precipitação diária acumulada durante o ciclo 2009/2010 da cultura da soja. Para esse período a temperatura esteve dentro dos padrões climatológicos. Pela figura é possível observar que durante o ciclo houve dois períodos de stress hídrico de diferentes magnitudes. O primeiro ocorreu entre os 73 e 100 dias após o plantio (DAP). O segundo abrange o período do 102^o e 130^o DAP, mas ambos foram de pequeno impacto sobre a produtividade.

Tabela 3: Precipitação climatológica e acumulada mensal ao longo do ciclo da soja 2009/2010.

Mês	Média climatológica (mm/mês)	Precipitação acumulada no ciclo 2009/2010 (mm/mês)
Dezembro	150	207
Janeiro	150	258
Fevereiro	125	109
Março	120	55
Abril	150	129
Total	620	758

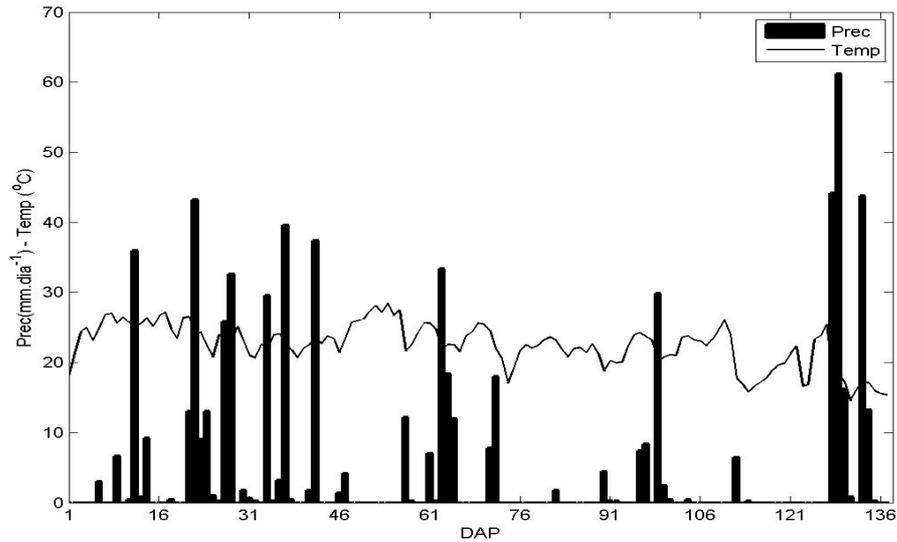


Figura 7 - Temperatura média diária e precipitação diária acumulada durante o ciclo da cultura. Escala temporal em Dias Após o Plantio (DAP)

3.2 Balanço de Energia observado

A figura 8 ilustra as diferenças no balanço de energia no sítio experimental de Cruz Alta-RS para o SD, com duas situações de cobertura do solo. A figura 8(a) mostra a partição do saldo radiativo para o dia 14 de Dezembro de 2009, na data da semeadura da soja. A superfície está coberta por uma fina camada de palha, resultado da deposição dos resíduos culturais da aveia cultivada no período anterior à soja. É possível observar nesse caso que a componente predominante dos fluxos turbulentos é H. No dia 28 de Fevereiro (Fig. 8c) de 2010 (64 DAP), essa configuração da partição da energia muda. Nesse período a soja está em fase de crescimento, com o máximo de IAF. Assim a componente predominante passa a ser LE, impulsionada pela disponibilidade de umidade resultante da atividade fisiológica das plantas.

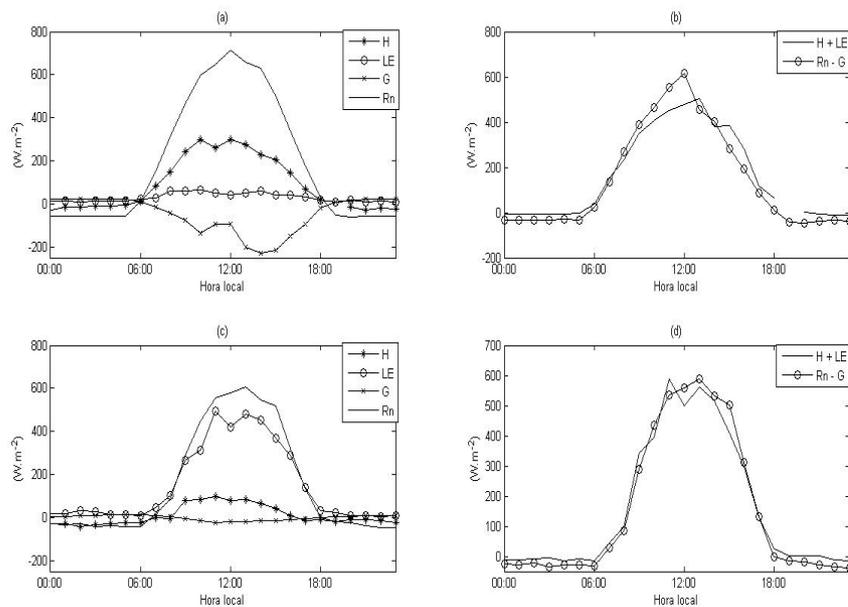


Figura 8 - Balanço de Energia no sítio experimental. (a) e (c) partição do saldo radiativo, (b) e (d) balanço de energia. Nos dois casos em superfície não vegetada (14/12/2009) e vegetada (28/02/2010), respectivamente.

No início do ciclo, quando o solo está mais exposto, G possui maior magnitude (Fig. 8a) se comparado com o período de vegetação mais desenvolvida (Fig. 8c). Isso ocorre porque à medida que a vegetação vai cobrindo o solo os raios solares são interceptados pelas folhas das plantas, diminuindo consideravelmente a quantidade de energia que chega à superfície.

As figuras 8(b) e 8(d) mostram fechamento do balanço de energia para os dias 14 de Dezembro de 2009 e 28 de Fevereiro de 2010, respectivamente. Nota-se de ambas as figuras que o balanço de energia é bem representado pelos dados experimentais.

O balanço de energia dos dados coletados no SC não é apresentado, pois o fluxo de calor no solo (G) não foi medido na parcela cultivada nesse sistema.

3.3 Índice de Área Foliar

A figura 9 apresenta o Índice de Área Foliar (IAF) simulado e experimental para os dois sistemas de plantio para o ciclo da soja 2009/2010. O IAF simulado acompanha em fase o ciclo dos valores observados (Fig. 9(a)). Porém, em termos quantitativos, o modelo tende a subestimar as observações. No início do ciclo da cultura o Agro-IBIS não acompanha o aumento do IAF observado. No 30^o DAP, por exemplo, o IAF experimental é em torno de 1

$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$, e o valor simulado foi de aproximadamente $0.5 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$. Esta tendência de subestimativa do IAF segue até o início do período de maturação fisiológica da cultura.

Tabela 4: Coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) para o Índice de Área Foliar. PD (Sistema de Plantio Direto), PC (Sistema de Plantio Convencional)

	R(SD)	R²(SD)	R(SC)	R²(SC)
IAF	0,85	0,72	0,89	0,79

Comparando o IAF dos dois sistemas de plantio com os valores simulados, observa-se que o modelo tem uma leve tendência em se aproximar mais dos valores obtidos na parcela de cultivo em sistema convencional (Tabela 4). O modelo não representa adequadamente o IAF no final do ciclo da cultura. A partir do 100° DAP, quando se intensifica a senescência e queda foliar os valores simulados passam a ser superestimados. Isso indica que a parametrização da senescência foliar das plantas no final do ciclo cultura pode estar com problemas. Essa conclusão não é definitiva, visto que os dados observados podem estar contaminados com os efeitos da ferrugem asiática (*Phakopsora Pachyrhizi*), uma doença que atingiu o sítio experimental que traz, entre outras consequências, uma aceleração na queda das folhas. Apesar dos efeitos da doença, ela não é a única justificativa pelo resultado insatisfatório no período de senescência foliar. A parametrização do IAF é um aspecto que precisa ser reavaliado na estrutura do modelo.

Em linhas gerais, modelo mostra-se adequado para simular a fenologia da cultura, antes do período de senescência foliar. Uma fonte constante de incerteza em termos de simulação é como tratar adequadamente a senescência foliar em sistemas agrícolas. Essa dificuldade é recorrente e tem sido citada em trabalhos semelhantes anteriormente (Suyker et al., 2005).

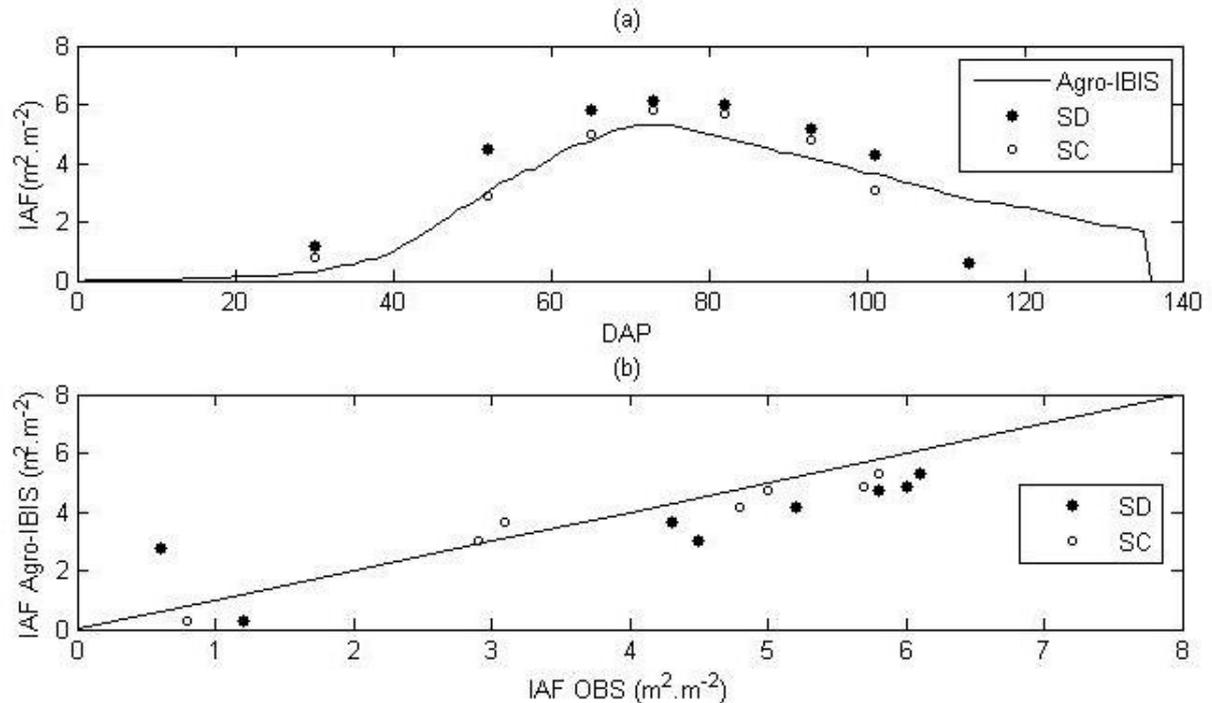


Figura 9 - Índice de área foliar simulado e observado nos dois sistemas de manejo. (a) Valores simulados e observados. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e observados.

Kucharik e Twine (2007) também relatam a importância e a necessidade de melhorias na representação de senescência foliar dos agroecossistemas. Além dos problemas identificados no estudo relacionado à soja, a avaliação do modelo SiB2 (Simple Biosphere Model, Sellers et al. 1996c) adaptado para a cultura do trigo realizada por Hanan et al. (2005) também citaram problemas com a simulação da senescência foliar. Segundo eles, isso ocorre em virtude da dificuldade em parametrizar a relação entre a mudança na área foliar causada pela senescência e a atividade fisiológica das plantas. O Agro-IBIS usa, atualmente, coeficientes empíricos da folha após o pico do IAF ser alcançado, que agem em combinação com uma redução do volume de carbono alocado no tecido das folhas, que harmoniza a senescência foliar, após enchimento de grãos ser iniciado. Outra fonte de erro do modelo pode estar ligada ao uso de um valor constante de SLA (área foliar específica) durante todo o ciclo de crescimento da cultura. De acordo com Yin et al. (2000) a SLA varia significativamente com as variáveis ambientais e o estágio de desenvolvimento das plantas. Além disso, há uma série de outros fatores, relacionados aos nutrientes do solo, idade das plantas, o genótipo de cultura, e os impactos de pragas e doenças que não são tratadas pelo modelo, mas são importantes para mudanças no cômputo da área foliar verde (Birch et al., 1998).

As melhorias sugeridas para a senescência foliar em modelagem de culturas agrícolas, focam na ligação do IAF com o Nitrogênio foliar (Yin et al., 2000). A abordagem de Yin et al. (2000) pressupõe que as folhas morrem quando a concentração de Nitrogênio na folha é menor do que o necessário para a realização da fotossíntese. Nesta simulação, foi assumido que o nitrogênio não é limitante para o desenvolvimento da cultura, mas esta é uma generalização do que acontece na realidade. Na prática, é provável que se tenha variações nos níveis de nitrogênio, principalmente no final do ciclo das culturas.

3.4 Balanço de Energia

Os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) foram obtidos experimentalmente para os dois sistemas de manejo, já o fluxo de calor no solo (G) somente para o SD. A diferença entre H e LE para os dois sistemas de manejo chega, no máximo, a 2%. Pela pequena diferença, dentro da margem de erro experimental, entre H e LE e pela ausência de medidas experimentais de G no SC a avaliação das componentes do balanço de energia com o modelo será feita somente para o SD.

A Figura 10 mostra as médias diárias de H, LE, G e Rn simulado e observado para todo o ciclo da soja. Nos primeiros 30 DAP, H e LE são superestimados pelo modelo. As médias diárias de G e Rn apresentam menores desvios durante o estágio inicial de desenvolvimento da cultura. A partir do 30^o DAP, quando o dossel começa a cobrir uma maior fração do solo, todas as componentes do balanço de energia representam resultados similares aos valores observados.

Entre os dias 45 e 105 após o plantio, quando a soja atinge o IAF máximo, a cultura apresenta alta atividade fotossintética, resultando em elevada transpiração. Com a maior assimilação de carbono e de transpiração, LE se torna a componente mais intensa do balanço de energia. Por outro lado, como a superfície está completamente sombreada pela cultura, há pouca radiação chegando ao solo. Por isso, G tem pequena magnitude nessa etapa do ciclo da cultura, como visto na seção 3.2. Neste período o modelo apresenta uma boa concordância com os dados experimentais.

À medida que a soja vai chegando ao final do ciclo, a partir do dia 100, vai se intensificando o processo senescência e perda das folhas, que se acumulam secas sobre a

superfície do solo. Nesse período novamente o modelo passa a superestimar LE, resultado da má representação da senescência das folhas e, conseqüente, superestimativa da IAF.

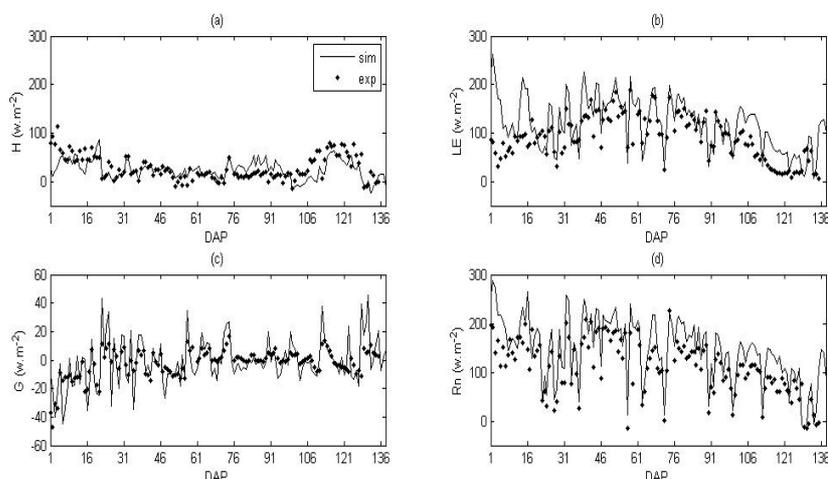


Figura 10 - Médias diárias das componentes do balanço de energia ao longo do ciclo da soja. (a) Fluxo de calor sensível, (b) fluxo de calor latente, (c) fluxo de calor no solo e (d) saldo de radiação.

Analisando os gráficos da dispersão (Figura 11) entre as médias diárias observadas e simuladas do H (Fig. 11a) e LE (Fig. 11b) nota-se que há grande dispersão entre os valores. O coeficiente de determinação (R^2) indica uma concordância maior entre valores simulados e experimentais para LE. Assim fica evidente a necessidade de melhor ajuste do modelo, a fim de melhorar a partição do saldo de energia, principalmente no início e no fim do ciclo da cultura, já que no período em que o solo se encontra sombreado pelas folhas das plantas o resultado das simulações é satisfatório.

A figura 12 mostra o ciclo diurno das componentes do balanço de energia, separado em dois períodos: (i) logo após a emergência da cultura (do dia 12 até o dia 24 após o plantio); (ii) quando a cultura atinge o IAF máximo (do dia 72 ao 84 após o plantio). O saldo radiativo R_n (Fig. 12d) é bem representado no período da manhã e superestimado à tarde durante os dois períodos considerados. No estágio inicial de desenvolvimento da cultura, quando o solo está mais exposto, (linhas e símbolos em cinza) durante o dia há muita energia sendo conduzida para o solo, por isso, G (Fig. 12c) e H (Fig. 12a) são superestimados e subestimados, respectivamente. O fluxo de calor latente LE (Fig. 12b) é bem simulado no período da manhã, mas à tarde ocorre uma superestimativa na simulação.

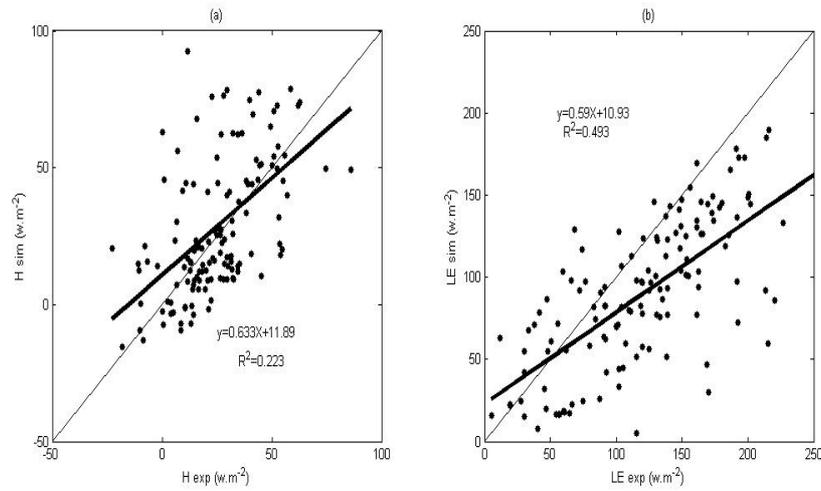


Figura 11: Dispersão para H (a) e LE (b).

Ao atingir o IAF máximo (linhas e símbolos pretos) as componentes do balanço de energia são melhor simuladas, principalmente no período da manhã; exceto para o G (Fig. 12c) que segue superestimado durante todo o dia, porém em menor intensidade. Isso mostra que o modelo tem um desempenho melhor à medida que a cultura atinge o IAF máximo.

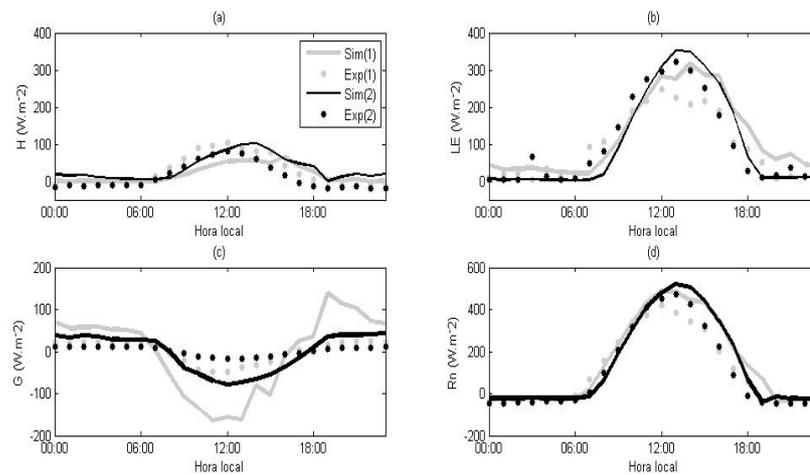


Figura 12 - Ciclo diurno das componentes do balanço de energia simuladas (Sim) e experimentais (Exp). Sim(1)-Exp(1) com a soja no estágio inicial de crescimento e Sim(2)-Exp(2) com o IAF máximo. (a) Fluxo de calor sensível, (b) fluxo de calor latente, (c) fluxo de calor no solo e (d) saldo de radiação.

3.5 Temperatura do Solo

Foi feita uma comparação entre as médias diárias da temperatura do solo simuladas e experimentais (Fig. 13) ao longo do ciclo da cultura da soja. Esta variável foi medida somente na parcela em que foi cultivado o SD. A figura 13(a) mostra as médias diárias experimentais e simuladas para os 137 dias do ciclo. Pela figura, nota-se que o modelo tem bom desempenho na simulação dessa variável, principalmente entre os dias 20 e 120 após o plantio. Nesse período o solo está sombreado pela soja que passa pelo seu estágio máximo de desenvolvimento com rápido crescimento do IAF. O período que antecede o dia 20 compreende o período de emergência e início de crescimento da cultura. Com isso o solo ainda não está coberto. Após o dia 120 a soja está no período de senescência foliar. Sendo assim as folhas verdes das plantas, que antes cobriam o solo, agora formam uma camada de palha sobre a superfície.

A figura 13(b) mostra a diferença entre a temperatura do solo simulada e experimental. É possível notar que no início do ciclo da cultura, o modelo chega a superestimar a temperatura do solo em 5 °C. À medida que a cultura vai se desenvolvendo os valores simulados se aproximam dos experimentais. Ao final do ciclo, após a senescência foliar, os valores simulados voltam a se afastar dos experimentais.

O diagrama de dispersão entre os valores simulados e observados da temperatura do solo está na figura 13(c). Os coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) entre as duas variáveis são, respectivamente, 0,89 e 0,80. Esses valores mostram o bom desempenho do modelo na simulação dessa variável.

A superestimativa da temperatura do solo pelo modelo no início e no final do ciclo da soja pode ser justificada pela presença da palha sobre o solo. A superfície que se encontra coberta pela palha recebe uma quantidade menor de radiação se comparada ao solo nu causando, conseqüentemente, uma redução na temperatura. O modelo, como não tem a parametrização dos resíduos culturais, não é capaz de simular os efeitos de sua presença.

O efeito da presença da palha na temperatura do solo diminui à medida que a soja vai crescendo. Isso ocorre, pois, com o aumento do IAF, a radiação solar passa a ser interceptada pelas folhas das plantas. Assim, a presença da palha sobre a superfície não afeta a temperatura do solo com tanta intensidade.

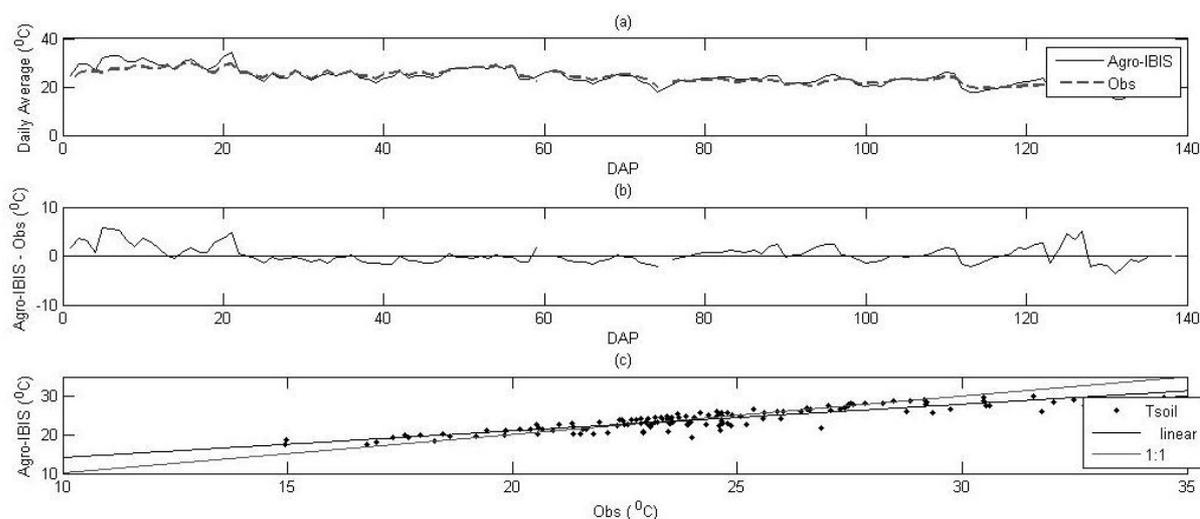


Figura 13 - Temperatura do solo: (a) Média diária simulada e experimental. (b) Média diária simulada – média diária experimental. (c) Diagrama de dispersão entre valores simulados e experimentais.

3.6 Umidade do Solo

A figura 14(a) apresenta as médias diárias simuladas e experimentais do conteúdo de água no solo para o ciclo 2009-2010 da soja para os dois sistemas de cultivo. As medidas de umidade foram realizadas em duas camadas: 0-20 cm e 20-50 cm de profundidade. A partir dessas medidas foi feita a média ponderada dos valores experimentais a fim de obter o valor da umidade do solo para a camada de 0-50 cm.

No período em que houve disponibilidade hídrica suficiente, o modelo teve boa performance nos dois sistemas de plantio. A magnitude dos erros aumenta a partir do 90^o DAP, porque nesse período houve falta de precipitação (seção 3.1), provocando um decréscimo na umidade do solo. Nesse período, comparando os dois sistemas de plantio, nota-se que os valores de umidade do solo simulados estão mais próximos dos observados no sistema de SC. Como era de se esperar, pela ausência da parametrização dos resíduos culturais no Agro-IBIS, os valores da umidade observados no sistema de SD são mais elevados se comparados com os simulados, o que é motivado pela presença da palha sobre o solo.

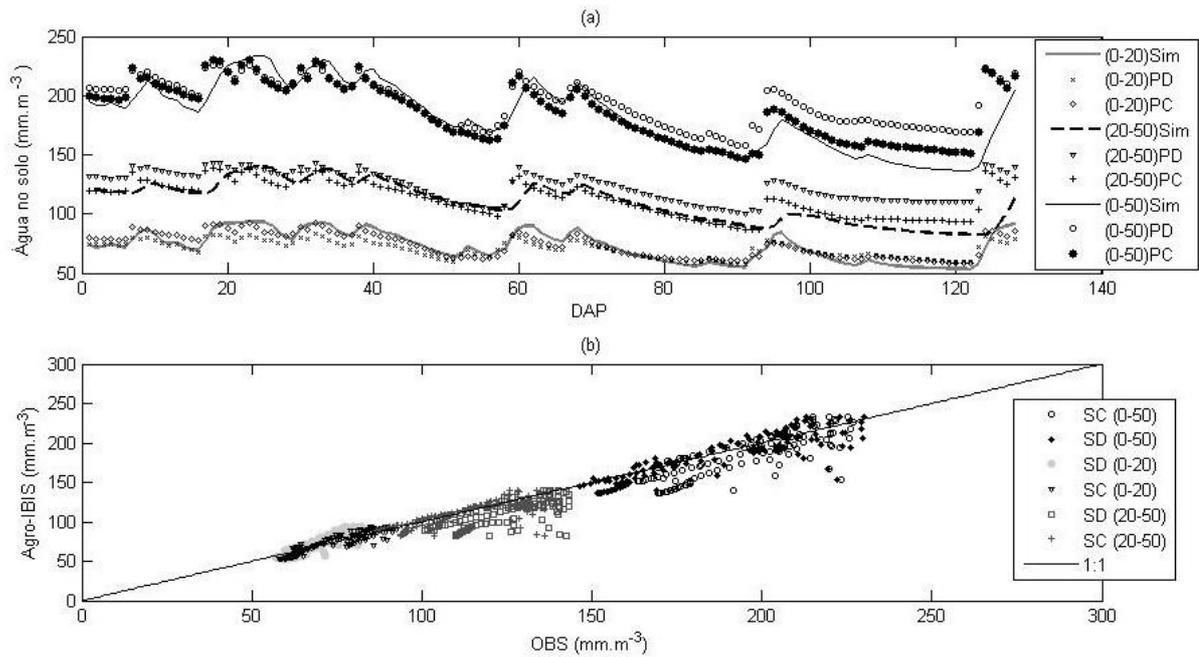


Figura 14 - Valores simulados e observados do conteúdo de água no solo para as camadas 0-20 cm, 20-50 cm e 0-50 cm. (a) Médias diárias para as três camadas. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.

A figura 14(b) traz os diagramas de dispersão entre os valores simulados e observados da umidade do solo para os dois sistemas de plantio e para cada uma das camadas descritas acima. Na Tabela 5, estão os valores dos coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) para os diferentes sistemas de cultivo e as respectivas camadas de solo.

Comparando os valores de umidade do solo observados nos dois sistemas de plantio com os simulados, e os dados da Tabela 5, é possível aferir que o modelo apresenta resultados mais próximos dos observados no SC em todas as camadas. Apesar de estarem próximos, os coeficientes estatísticos indicam sempre maior semelhança entre os resultados simulados e os observados no SC.

Assim, os comentários acerca da figura 14(a), ficam fortalecidos. Obtêm-se melhores resultados na simulação da umidade do solo quando se compara os valores simulados com os observados no sistema de cultivo de SC. Isso é plenamente justificado pela ausência da representação dos resíduos culturais no Agro-IBIS.

Tabela 5: Coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) para umidade do solo. PD (Sistema de Plantio Direto), PC (Sistema de Plantio Convencional)

	R(SD)	R²(SD)	R(SC)	R²(SC)
0-20 cm	0,89	0,79	0,92	0,84
20-50 cm	0,73	0,53	0,78	0,60
0-50 cm	0,83	0,68	0,88	0,77

3.7 Balanço de CO₂

3.7.1 CO₂ Diurno

O comportamento da troca líquida de CO₂ pelo ecossistema (NEE) para os dois sistemas de plantio são comparados aos valores simulados na Fig. 15(a). Experimentalmente, a soja foi fonte de CO₂ até aproximadamente duas semanas após a data do plantio e nas três semanas antes da maturação fisiológica para os dois sistemas de manejo. Desta forma, a soja foi fonte de CO₂ num total de sete semanas e sumidouro por 12 semanas. Praticamente não houve diferença entre as datas em que cada sistema de plantio tornou-se fonte ou sumidouro de CO₂. No entanto, as magnitudes da absorção ou da emissão foram diferentes.

O modelo acompanha a tendência do NEE diurno de forma satisfatória até o 95^o DAP. A partir dessa data os dados experimentais indicam que o ecossistema da soja passa a ser fonte de CO₂, sendo que o modelo segue indicando absorção. Nesse sentido, pode-se concluir também que o modelo simula melhor o NEE fora do período de senescência foliar.

A Fig.15(b) traz o diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais para o NEE diurno. Os coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) entre os valores simulados e observados no SD e SC são, respectivamente, 0,617, 0,612, 0,38 e 0,37, caracterizando a relação entre valores simulados e experimentais. Nota-se, nesta figura, também que a relação entre dados simulados e observados é melhor nas condições em que o ecossistema se apresenta como sumidouro de Carbono. No momento em que os valores de NEE passam a ser positivos, indicando emissão de CO₂, a dispersão indica subestimativa por parte do modelo. Isso reforça a conclusão obtida na Fig.16(a).

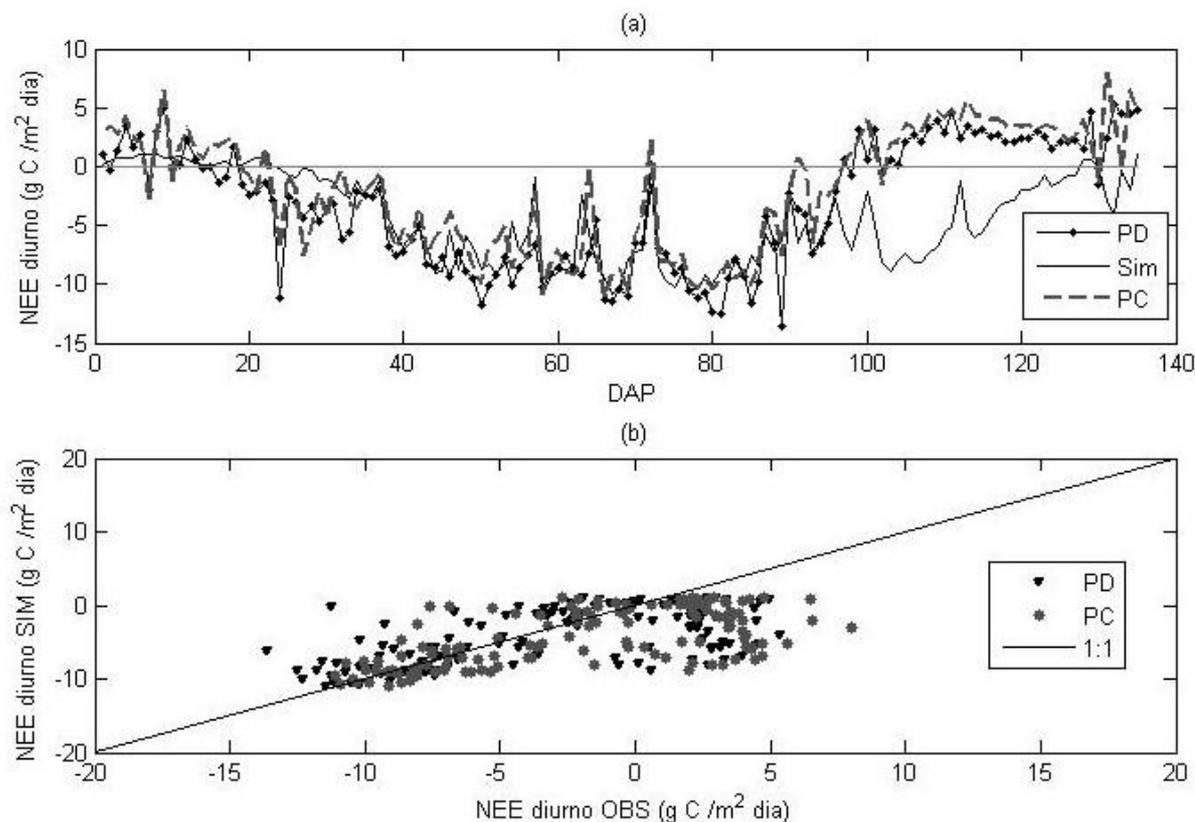


Figura 15 - NEE diurno (das 8 às 18 horas). (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.

O comparativo entre a produtividade líquida do ecossistema (NEP), entre os dois sistemas de manejo do solo e os resultados simulados é ilustrado na figura 16(a). Comparando os dois sistemas de manejo, é possível verificar que o modelo acompanha o valor do NEP para o SC de forma mais próxima até o 90^o DAP. A partir do início do período de senescência foliar quando os dados observados indicam que o ecossistema passa, novamente, a ser fonte de CO₂ o modelo deixa de representar adequadamente a produção líquida do ecossistema. Essa inconsistência deve estar relacionada com a má representação da NEE na parte final do ciclo da cultura, como mostrado na figura (15).

A Fig. 16(b) mostra o diagrama de dispersão entre os valores simulados e observados nos dois sistemas de manejo. Os coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) entre os valores simulados e observados no SD e SC são, respectivamente, 0,955, 0,929, 0,912 e 0,863, demonstrando a boa relação entre valores simulados e experimentais no período que antecede a senescência foliar. No final do ciclo, o modelo passa a superestimar a NEP demonstrando a necessidade de rever a representação da senescência foliar e os processos por ela influenciados.

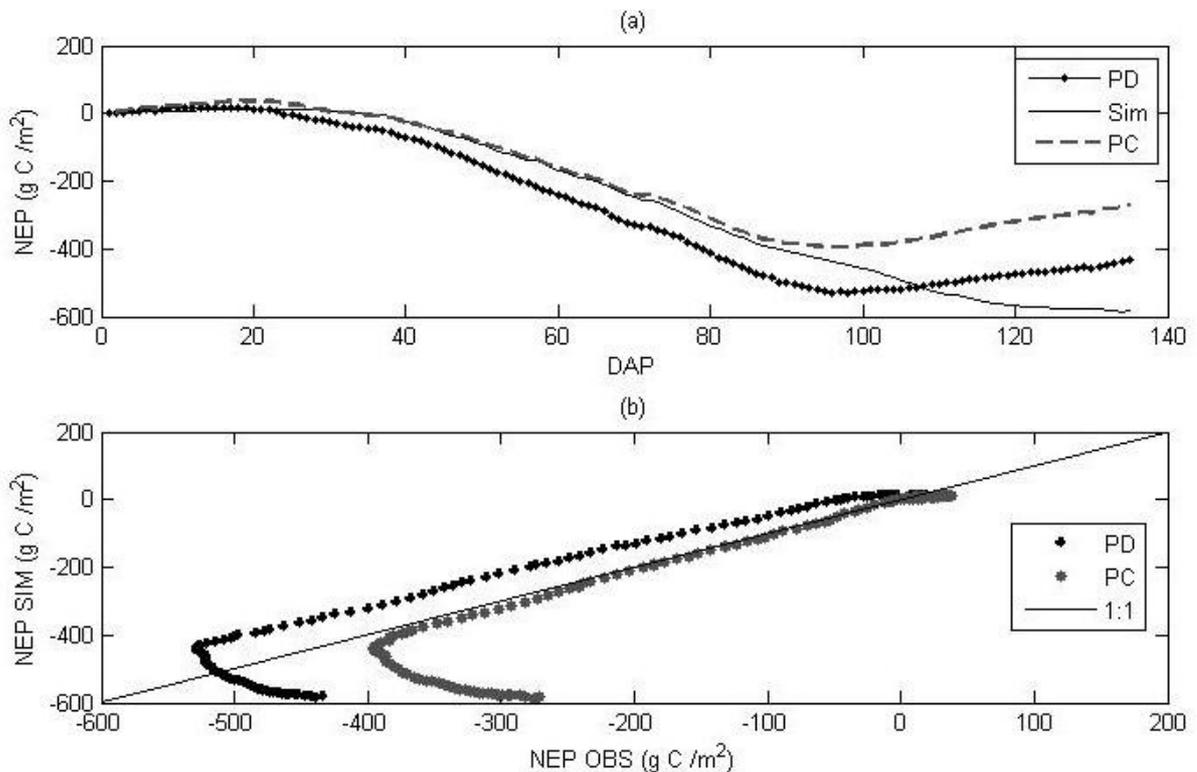


Figura 16 - NEP diurno (8 às 18 horas). (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.

3.7.2 CO₂ Noturno

Conforme a figura 17(a), os resultados para a troca líquida de CO₂ (NEE) no período noturno, o que equivale à respiração noturna, apresentados pelo modelo se mostraram pouco consistentes em relação aos dados observados. A média diária simulada foi de $0.622\ g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$, muito abaixo das médias diárias dos dados experimentais, que ficam em torno de $4\ g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$, em ambos os sistemas de manejo. Seguramente essa é a variável que apresenta a maior diferença entre valores observados e simulados. Segundo Kucharik e Twine, 2007, estudos demonstram que o IBIS também subestimou a respiração em ecossistemas florestais. Isso leva a concluir que a subestimativa na respiração não é causada exclusivamente pela não representação dos resíduos culturais, mas sim pela própria parametrização da respiração no modelo, particularmente no que se refere à respiração do solo.

Pela figura 17(b) é possível concluir que a correlação entre os dados simulados e experimentais é extremamente baixa. Os coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) entre os valores simulados e observados no SD e SC são, respectivamente, 0,38, 0,31, 0,14 e 0,096.

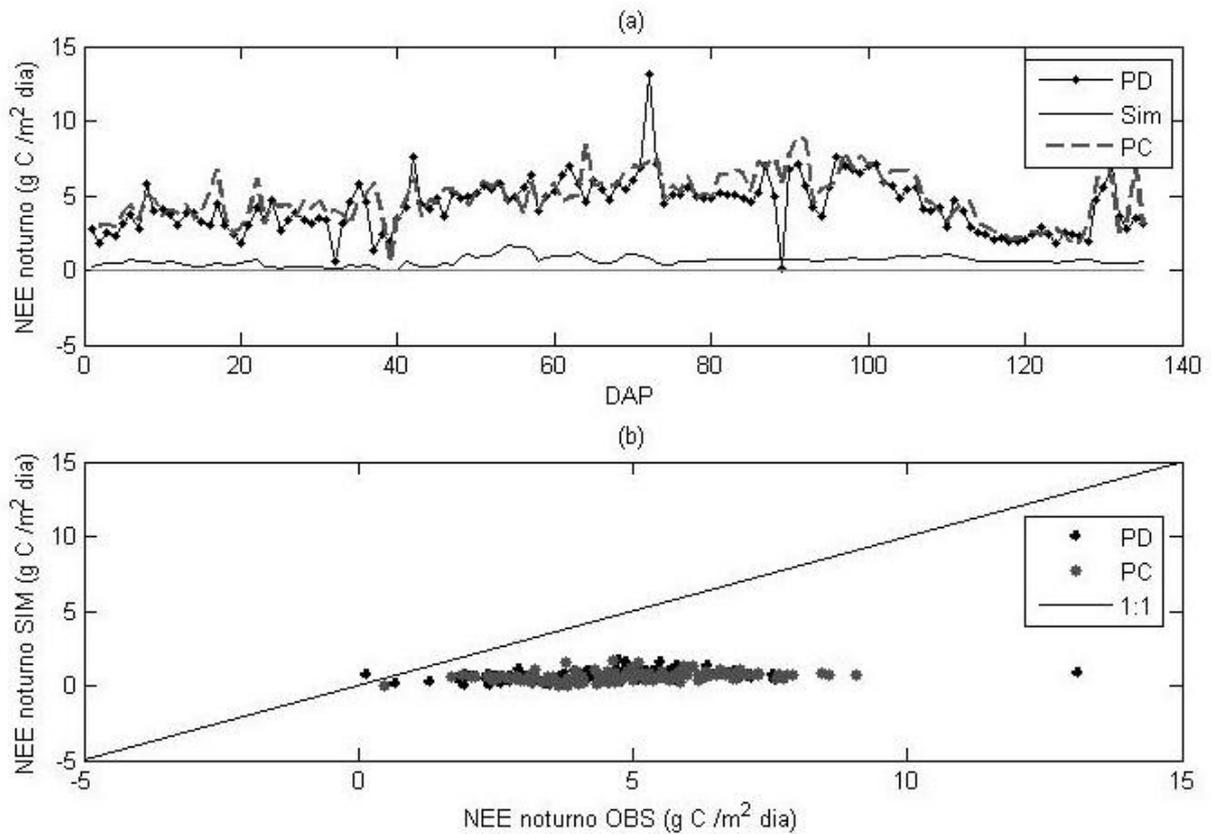


Figura 17 - NEE noturno (das 18 às 8 horas) (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.

3.7.3 CO₂ Diário

As médias diárias, usando dados simulados e experimentais das 24 horas do dia, do NEE são apresentados na figura 18(a). A comparação dos dados observados nos dois sistemas de manejo do solo com os dados simulados mostra que na maior parte do ciclo o modelo superestima a troca líquida de CO₂. Esse resultado pode ser explicado pela forte subestimativa da respiração pelo modelo (Fig.17 (a)).

Na figura 18(b), o diagrama de dispersão entre os dados simulados e experimentais, também indica a superestimativa do NEE por parte do modelo. Os coeficientes de correlação entre os dados observados e simulados para SD e SC são, respectivamente, 0,616 e 0,609. Já os coeficientes de determinação para SD e SC são 0,379 e 0,37, respectivamente.

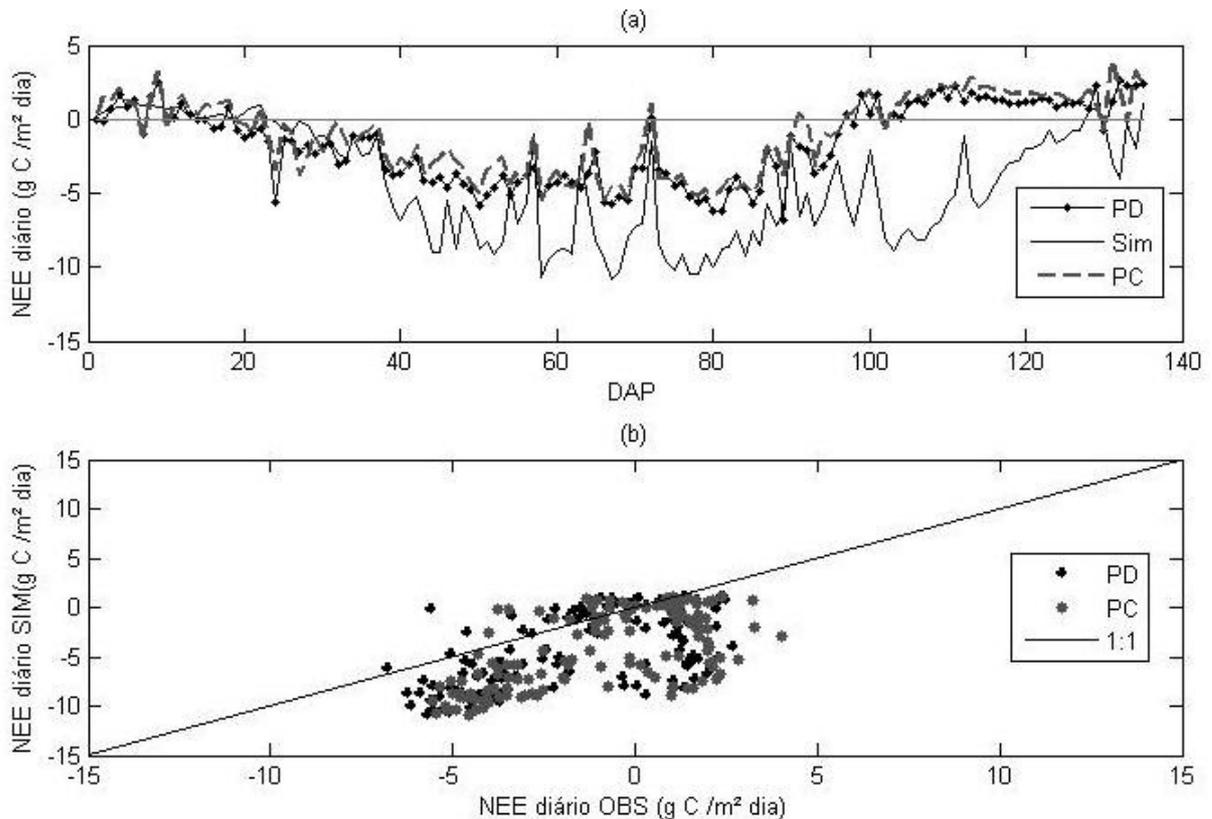


Figura 18 - NEE diário. (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.

O comparativo entre a produtividade líquida do ecossistema (NEP) para as 24 horas do dia entre os dois sistemas de manejo do solo e os resultados simulados é ilustrado pela figura 19. O modelo não representa a NEP de forma adequada. A superestimativa por parte do modelo inicia no 40^o DAP, e se estende até o final do ciclo da cultura. Em termos quantitativos a NEP experimental no final do ciclo do SC, por exemplo, atinge em torno de 100 g C m⁻² e o valor simulado chega a 600 g C m⁻², indicando forte superestimativa por parte do Agro-IBIS. Essas inconsistências podem ser justificadas pelos problemas em relação ao CO₂ apresentados nas análises das figuras anteriores.

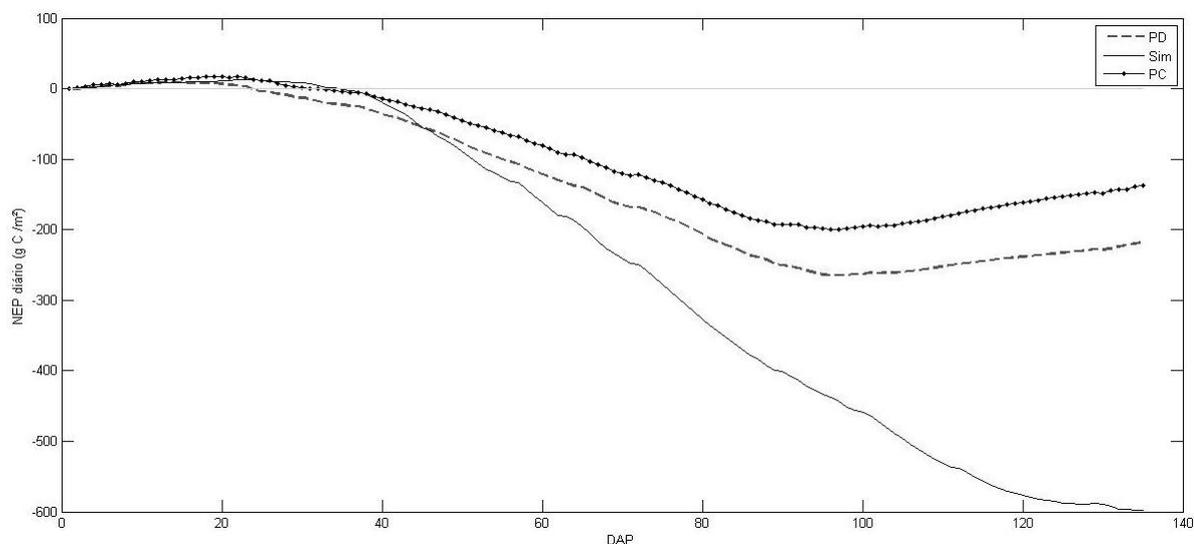


Figura 19 - NEP diário. Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD

3.8 Evapotranspiração

O comportamento sazonal da ET diária para a soja nos dois sistemas de plantio foi semelhante, conforme apresentado no Fig. 19. Após a emergência, a ET aumenta gradualmente de um valor médio de 2 para aproximadamente 6 milímetros por dia no período de máximo desenvolvimento da cultura, período de enchimento de grãos, ou seja, de IAF máximo.

O modelo representa de forma satisfatória a ET ao longo do ciclo da cultura. Com exceção do início e do final do ciclo, como mostra a figura 19(a), as médias diárias simuladas e experimentais tem boa correlação (R). Para SD 0,828 e para SC 0,803, respectivamente. Já R^2 para SD e SC valem, respectivamente, 0,685 e 0,644. O problema na representação do modelo, que é mais acentuado no final do ciclo da cultura, deve estar relacionado à superestimativa do IAF simulado, fazendo com que o modelo acabe transpirando mais em relação à indicativa dos dados observados.

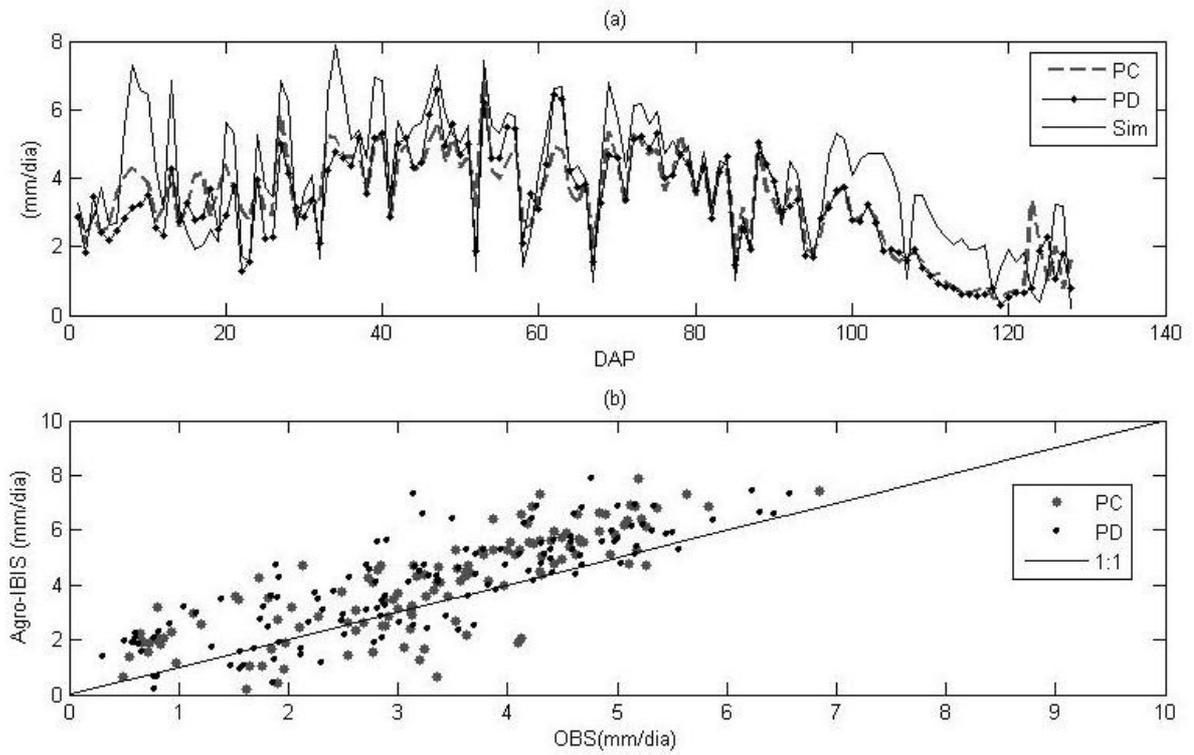


Figura 20 - Evapotranspiração: (a) Médias diárias simuladas e observadas no SC e SD. (b) Diagrama de dispersão entre os valores simulados e experimentais.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados obtidos através da validação do modelo Agro-IBIS para um sítio experimental de soja no Rio Grande do Sul. O modelo foi forçado com dados meteorológicos horários obtidos por uma estação automática do INMET e a comparação dos dados simulados com os observados foi realizada. O período avaliado compreende um ciclo da cultura de soja, que iniciou com a semeadura no dia 14 de Dezembro de 2009 com encerramento no dia 28 de Abril de 2010 com a colheita.

Nas análises referentes à umidade do solo, foram feitas três análises (camadas de 0-20cm, 20-50cm e 0-50cm) para avaliar o desempenho do modelo. Em todas elas os resultados do modelo se aproximaram mais dos obtidos na parcela de SC. Os valores experimentais de umidade do solo no SD são levemente maiores que os do SC, o que deve ser resultado da presença da camada de palha, formada por resíduos culturais, sobre a superfície. Como o modelo não tem a parametrização dos resíduos culturais, ou seja, do SD, esse resultado é esperado.

Para o IAF, é possível verificar que existe uma leve tendência do modelo em se aproximar dos dados observados no SC. O IAF do período de senescência foliar, a partir do 100⁰ DAP, não está sendo bem representado pelo modelo. Como foi mencionado na seção 3.2, esse problema já foi encontrado em outros trabalhos que modelam o IAF de acordo com a metodologia da área foliar específica. No entanto, para o caso da soja ainda pode ser bastante melhorado.

A temperatura do solo, analisada apenas para o SD, foi bem representada pelo modelo. Como os valores experimentais analisados são do SD, pelo efeito da cobertura da superfície pela palha, é esperado que no início e no final do ciclo o modelo apresente valores superestimados. À medida que o IAF aumenta sombreando a superfície o efeito da palha na temperatura é atenuado fazendo com que o modelo represente bem o comportamento observado experimentalmente.

As componentes do balanço de energia foram avaliadas somente para o SD. Mesmo assim o modelo faz uma boa representação das componentes. Assim como a maioria das variáveis simuladas, o modelo demonstra melhor desempenho quando a cultura atinge maior IAF, diminuindo os efeitos da cobertura da palha sobre o solo. Isso pode ser destacado no fluxo de calor no solo, que pelo efeito da camada de resíduos culturais, no início do ciclo da cultura foi superestimado pelo Agro-IBIS. Com o desenvolvimento da cultura, e consequente

aumento do IAF, a superfície passa a ser sombreada e os efeitos da palha diminuem. Nesse período os dados simulados e observados passam a estar mais próximos.

Alguns processos relacionados ao CO₂ apresentaram problemas durante a simulação. A representação da respiração por parte do modelo para a soja está inadequada. Um dos fatores que pode influenciar nesse sentido é a quantidade de matéria orgânica presente no solo do sítio experimental. Essa quantidade é importante no cômputo da respiração, pois é a partir dela que os microorganismos do solo realizam a respiração.

A evapotranspiração, estimada experimentalmente para os dois sistemas de manejo, foi representada de forma satisfatória pelo modelo principalmente no período de maior IAF. No início e no final do ciclo o modelo apresentou picos de superestimativa da evapotranspiração, o que pode estar relacionado com os problemas relacionados ao IAF simulado, citados anteriormente.

Nos processos relacionados à umidade do solo, é possível verificar uma tendência clara de maior proximidade entre os dados simulados e os observados no SC. Nas demais variáveis analisadas para os dois sistemas de manejo (IAF, evapotranspiração e CO₂), não é possível afirmar a tendência do modelo em se aproximar de algum dos sistemas de manejo aqui discutidos.

Analisando o trabalho como um todo, é possível concluir que o modelo Agro-IBIS é capaz de simular com boa aproximação os processos relacionados ao agroecossistema da soja no Rio Grande do Sul.

Por fim é necessário destacar a importância de trabalhar no sentido de implementar uma representação do manejo dos resíduos culturais nos modelos usados na simulação dos ecossistemas agrícolas. Pelos resultados obtidos nesse trabalho fica clara a grande influência que os sistemas de manejo têm nos ecossistemas. Processos importantes como o balanço hídrico e de energia, o ciclo do carbono no ecossistema são fortemente influenciados pela forma de manejo do solo. Com a quase totalidade das áreas agrícolas cultivadas com cereais sob manejo de SD é essencial que seus efeitos sejam incorporados aos modelos para que possam ser considerados nas previsões de tempo, cenários futuros de clima e em todas as outras aplicações dos modelos de interação biosfera-atmosfera.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R. G. et al. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.HTM> , Roma, Itália, 1998.

Anthoni, P.M. et al. **Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany**. Agricultural and Forest Meteorology 121 (1–2), 55–67, 2004a.

Aubinet, M. et al. **Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology**, Adv. Ecol. Res. 30, 113–175, 2000.

Baldocchi, D.D.; Vogel, C., Hall, B. **Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest**. Agricultural and Forest Meteorology 83, 147–170, 1997

Ball, J.T.; Woodrow, I.E.; Berry, J.A. **A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photo- synthesis under different environmental conditions**. p. 221–224. In J. Biggins (ed.) Progress in photosynthesis research. Vol. 4. Martinus Nijhoff, Zoetermeer, the Netherlands, 1986.

Birch, C. J.; Hammer, G. L.; Rickert, K. G. Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 49, p. 249-262, 1998.

Bonan, G. **Ecological Climatology: Concepts and Applications**. Cambridge University Press, Cambridge, 678 pp., 2002.

Bonan, G. B. **A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide**. NCAR Technical Note, 1996

Campbell, G.S.; Norman, J.M., **An introduction to environmental biophysics**. 2nd ed.

Springer Verlag, New York, 1997.

Ciais, P. et al. **The European carbon balance. Part 2: croplands.** *Global Change Biology*, 16, 1409-1428, 2010.

Collatz, J.G. et al. **Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer.** *Agricultural and Forest Meteorology* 53, 107–136, 1991.

Conab (www.conab.gov.br/conabweb) acesso em 15 de julho de 2010.

Cuadra, S.V. et al. **A biophysical Sugarcane growth model for global studies. Part I: Model description and validation of carbon and energy balances.** Submetido à *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010.

Cunha, G.R. et al. **Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul.** *Revista Brasileira Agrometeorologia*, 9 (Nº Especial: Zoneamento Agrícola): 446-459, 2001.

Dobermann, A.; Baker, J.M.; Walters, D.T. **Comment on “Carbon budget of mature notill ecosystem in North Central Region of the United States”.** *Agricultural and Forest Meteorology* 136, 83–84, 2006.

Easterling, W.E. et al. Food, fibre and forest products. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change**, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 273-313, 2007

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo.** Segunda edição. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Rio de Janeiro, 1997.

Falge, E. et al. **Gap filling strategies for long term energy flux data sets.** *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 71–77, 2001b.

Farquhar, G.D.; von Caemmerer, S.; Berry, J.A. **A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species.** *Planta* 149, 78–90, 1980.

Farquhar, G.D., and T.D. Sharkey. **Stomatal conductance and photosynthesis.** *Ann. Rev. Plant Physiol.* 33:317–345, 1982.

Fehr, W.E.; Caviness, C.E. **Stages of soybean development. cooperative extension service and agriculture and home economics experiment station.** Special Report 80. Iowa State University, Ames, IA, 1977.

Foley, J.A. et al. **An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics.** *Global Biogeochemical Cycles*, v.10, p. 603-628, 1996.

Freibauer, A. et al. **Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe.** *Geoderma* 122, 1–23, 2004.

Gilmanov, T.G. et al. **Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO₂-flux tower measurements.** *Global Biogeochem. Cycles* 17, 1071, 2003

Gomes, A. G.; Varriale, M. C. **Modelagem de Ecosistemas: Uma Introdução.** Santa Maria: Ed. da UFSM, 2001.

Hanan, N.P. et al. **Testing a model of CO₂, water and energy exchange in Great Plains tallgrass prairie and wheat ecosystems.** *Agricultural and Forest Meteorology* 131, 162–179, 2005.

Hollinger, S.E.; Bernacchi, C.J.; Meyers, T.P. **Carbon budget of mature no-till ecosystem in north central regions of the United States.** *Agricultural and Forest Meteorology* 130, 59–69, 2005.

Hollinger, S.E.; Bernacchi, C.J.; Meyers, T.P. **Corrigendum to “Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States.** Agricultural and Forest Meteorology 136, 88–89, 2006a.

Hollinger, S.E.; Bernacchi, C.J.; Meyers, T.P. **A reply to “Comment on ‘Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States’ by Dobermann et al.”** Agricultural and Forest Meteorology. 136, 85, 2006b

IPCC (2007). **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. Climate Change 2007.

Klein, V.A.; Libardi, P.L. **Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo 26, 857-867, 2002.

Kucharik, C.J. et al. **Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure.** Global Biogeochemical Cycles, v.14, p. 795-825, 2000.

Kucharik, C.J.; Brye, K.R. **Integrated Biosphere Simulator (IBIS) Yield and Nitrate Loss Predictions for Wisconsin Maize Receiving Varied Amounts of Nitrogen Fertilizer.** Journal of Environmental Quality, v. 32, 247-268, 2003.

Kucharik, C.J. **Evaluation of a Process-Based Agro-Ecosystem Model (Agro IBIS) across the U.S. Corn Belt: Simulations of the Interannual Variability in Maize Yield.** Earth Interactions, v.7, 2003.

Kucharik, C.J.; Twine, T.E. **Residue, respiration, and residuals: Evaluation of a dynamic agroecosystem model using eddy flux measurements and biometric data.** Agricultural and Forest Meteorology 146, 134–158. 2007.

Lovato, T.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Venazzani, F. **Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com rendimento do milho em sistemas de manejo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 28:175-187, 2004.

Lokupitiya, E. et al. **Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchanges from croplands.** Biogeosciences 6, 969–986 , 2009.

Mosier, A.R. et al. **Mitigating agricultural emissions of nitrous oxide.** Climate Change 40, 7–39, 1998.

Moureaux, C. et al. **Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop.** Agricultural and Forest Meteorology 139, 25–39, 2006.

Moureaux, C. Et al. **Carbon balance assessment of a Belgian winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.).** Global Change Biol. 14 (6), 1353–1366, 2008.

Pattey, E. et al. **Tools for quantifying N₂O emissions from agroecosystems.** Agricultural and Forest Meteorology 142, 103–119, 2007.

Roberti, D. R. et al. **Net carbon flux in a subtropical no-tillage soybean/black oat succession in southern Brazil.** Submetido à Agricultural and Forest Meteorology, 2011.

Rykiel, E. J. Jr. **Testing ecological models: the meaning of validation.** Ecological Modelling, 90, 229-244, 1996.

Saito, M. et al. **Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan.** Agricultural and Forest Meteorology 135, 93–109, 2005.

Sellers, P.J. et al. **A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I. Model formulation.** J. Climate 9, 676–705, 1996c.

Smith, P. **Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context.** Eur. J. Agron. 20, 229–236, 2004.

Smith, P. et al. **Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Agriculture. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA , 2007.

Smith, P. et al. **Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands.** *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139, 302-315, 2010.

Soegaard, H. et al. **Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling.** *Agricultural and Forest Meteorology* 114, 153–173 , 2003.

Sulflux (www.ufsm.br/sulflux) acesso em 15 de julho de 2010

Suyker, A.E. et al. **Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize.** *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 1–13, 2004.

Suyker, A.E. et al. **Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season.** *Agricultural and Forest Meteorology* 131, 180–190, 2005.

Suyker A.E.; Verma S.B. **Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem.** *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 417-427, 2008.