



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Calibração do modelo de superfície SiB2 para simulação de fluxos de CO₂ sobre cultura de soja em cruz alta/RS

Luciana da Silva Mieres¹; Rita de Cássia Marques Alves²; Claudineia Brasil Saldanha³; Débora Regina Roberti⁴

¹Geógrafa, Mestre em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, lucianamieres@yahoo.com.br. ²Profª. Doutora efetiva, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Coordenadora do Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, rita.alves@ufrgs.br. ³ Pesquisadora Doutora em Recursos Hídricos, Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, neiabrazil@yahoo.com.br. ⁴Profª Doutora efetiva, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, debora@ufsm.br.

Artigo recebido em 11/07/2013 e aceito em 17/09/2013

RESUMO

Esta pesquisa buscou avaliar o comportamento dos fluxos de CO₂ simulados pelo modelo de superfície SiB2, a partir da calibração de alguns parâmetros do modelo. O estudo foi desenvolvido em um sítio experimental de soja localizado em Cruz Alta no Rio Grande do sul. A validação dos resultados obtidos compreendeu a análise estatística dos fluxos simulados em comparação com os dados observados (obtidos pela torre micrometeorológica), a partir da calibração dos seguintes parâmetros: altura da base do dossel (Z1), altura do dossel (Z2), fração de cobertura vegetal (V), distribuição do ângulo foliar (XL), reflectância da folha viva no visível (α_v), porosidade do solo (θ_s), profundidade individual das camadas (zdepth), expoente de umidade (bee), índice de área foliar (IAF), condutância estomática mínima (B) e temperatura crítica para a respiração foliar (trdm). No que tange o processo de calibração, verificou-se que este resultou em um melhor ajuste do fluxo de CO₂ simulado, quando comparado ao obtido experimentalmente.

Palavras-chave: calibração, SiB2, CO₂ e soja.

Calibration of SiB2 for simulation of CO₂ fluxes above soybeans cultivation in Cruz Alta/RS

ABSTRACT

This research evaluated the behavior of the simulated CO₂ fluxes by the surface model SiB2, from the calibration of some parameters of the model. The study was developed in an experimental site of soybean located in Cruz Alta, Rio Grande do Sul. The validation of the results embraced the statistical analysis of the simulated fluxes in comparison to observed data (obtained by micrometeorological tower), from the calibration of the following parameters: canopy base height (Z1), canopy top height (Z2), vegetation cover fraction (V), leaf angle distribution (XL), live leaf reflectance in the visible (α_v), soil porosity (θ_s), depth soil moisture layer (zdepth), soil wetness expoent (bee), leaf area index (IAF), minimum stomatal conductance (B) and critical temperature for leaf respiration (trdm). In regard to the process of calibration, was found that this one resulted in a better adjustment of the simulated CO₂ fluxes than that one experimentally obtained.

Key-Words: Calibration, SiB2, CO₂ and soybean.

* E-mail para correspondência:
lucianamieres@yahoo.com.br (Mieres, L.S.).

Introdução

A conversão da cobertura vegetal natural em áreas agrícolas, afeta os ciclos biogeoquímicos, bem como os fluxos de carbono para atmosfera e a biodiversidade terrestre. A agricultura, por sua vez, constitui uma atividade de fundamental importância para o desenvolvimento econômico, por esta razão, nota-se o constante aumento de novas áreas agrícolas em detrimento de áreas de vegetação natural. Neste sentido, destaca-se o cultivo de soja o que contribui de forma direta com o desenvolvimento de alguns países, sendo o Brasil ocupante da segunda posição entre os maiores produtores mundial do grão e, dentro do contexto nacional, o Rio Grande do Sul destaca-se como o terceiro em produção nacional da oleaginosa.

Considerando-se a importância econômica que a cultura de soja representa ao Rio Grande do Sul, verifica-se a necessidade de se adquirir conhecimento a cerca desta atividade agrícola, permitindo-se a avaliação das interações ocorrentes no ambiente de desenvolvimento da cultura e, assim, adequar um planejamento com vistas à maximização do seu rendimento. Uma das interações ocorrentes entre a atmosfera e o ambiente de cultivo trata-se dos fluxos de dióxido de carbono (CO_2), que se refere à quantidade de CO_2 transferida da biosfera para a atmosfera por unidade de tempo.

Em estudos a cerca dos fluxos de CO_2 é possível utilizar-se de modelos de superfície, os quais são formulados para representar as

interações ocorrentes no sistema solo-planta-atmosfera. Para tanto, estes modelos são constituídos de equações governantes que geram variáveis prognósticas, obtidas a partir de parâmetros internos. Na literatura há diversos modelos que tratam da transferência solo-planta-atmosfera como SiB e SiB2 (Sellers et al., 1986, 1996a, b), IBIS (Foley et al., 1996), entre outros. Como objetivam a representação de uma superfície vegetada existe a necessidade de calibração dos parâmetros internos, para que estes estejam adequados ao tipo de bioma que se busca representar (Sellers et al 1996a). Este estudo busca avaliar o comportamento dos fluxos de CO_2 simulados por um modelo de superfície, após a calibração de alguns parâmetros intrínsecos à modelagem, assim, buscando-se verificar a importância deste processo na adequação do modelo à área de estudo.

Material e Métodos

Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental agrícola pertencente à Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigro (FUNDACEP), localizada no município de Cruz Alta ($28^{\circ}36'S$ e $53^{\circ}40'W$). Desde 2008, em razão do projeto Rede Sul-brasileira de Fluxos Superficiais (SULFLUX), foi instalada uma torre micrometeorológica, que realiza o monitoramento das trocas de energia, água e CO_2 sobre o sistema de plantio direto. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os dados obtidos

pela citada torre, referentes ano-safra de 2008/2009, destacando-se que neste ano-safra o plantio foi realizado em 28 de novembro de 2008 e sua colheita em 15 de abril de 2009.

No que tange às características do clima da área de estudo, nota-se que está sob domínio climático subtropical úmido com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, podendo ocorrer períodos de estiagem em determinados anos. A precipitação acumulada

anual é de 1630,7 mm, a temperatura média anual de 18,5°C e direção do vento predominante de sudeste (SE), conforme normal climatológica (1961-1990) disponibilizada pelo 8º Distrito de Meteorologia - INMET para o município de Cruz Alta. Na figura 1 visualiza-se a localização da área de estudo.

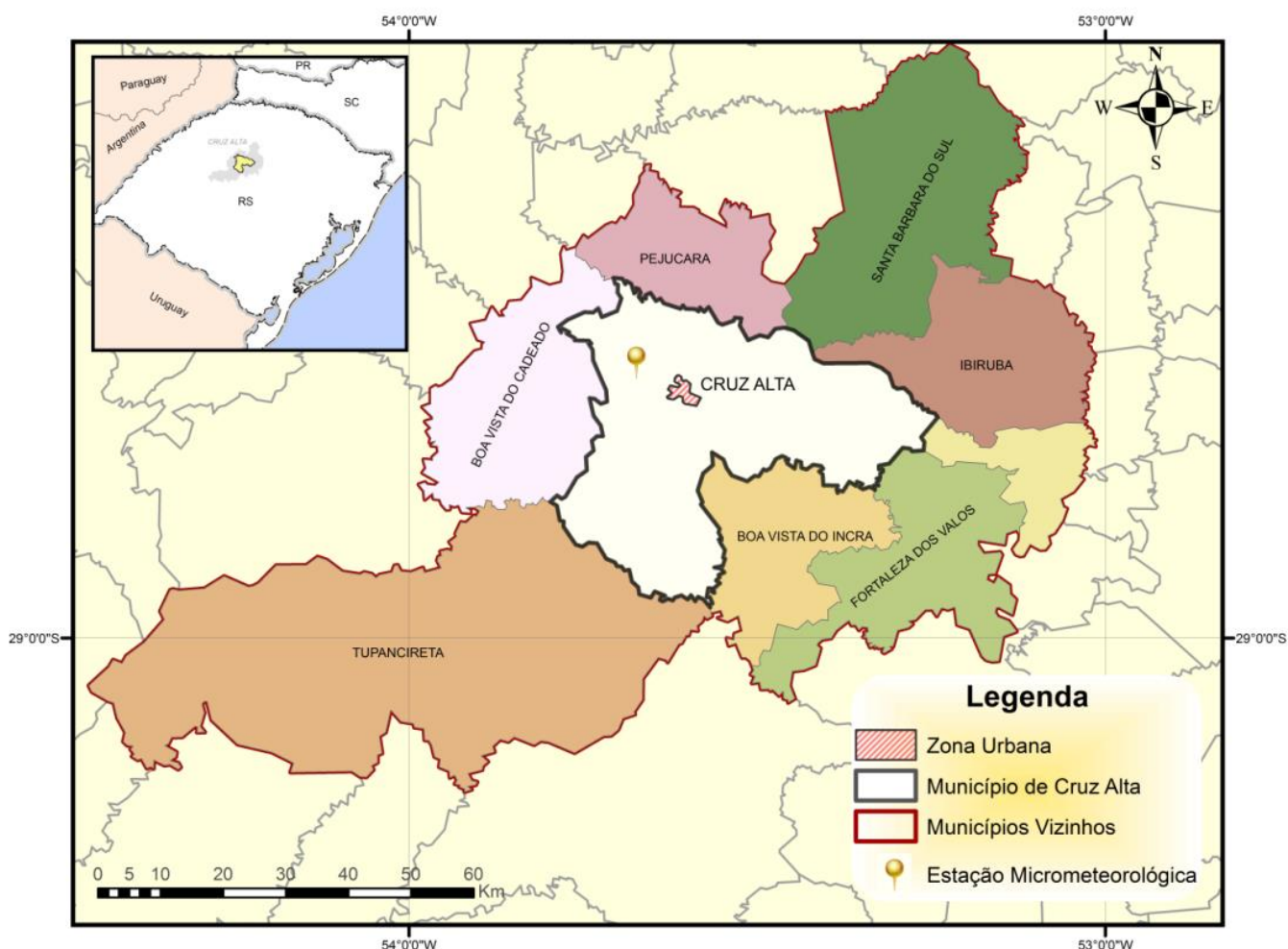


Figura 1. Localização da área de estudo.

Cultura de Soja

A soja é uma cultura de verão, que configura um cenário de grande importância econômica para o Rio Grande do Sul e, principalmente, para os municípios envolvidos diretamente com seu cultivo. Para a ocorrência de seu desenvolvimento, alguns fatores primários do ambiente são imprescindíveis, influenciando no seu rendimento, destacando-se a radiação solar, o oxigênio (O_2), o dióxido de carbono (CO_2), a temperatura do ar, a disponibilidade hídrica e os macro e micro nutrientes.

Com respeito à produtividade agrícola, ressalta-se que está ligada à variabilidade climática, e que estas variações constituem-se como um dos fatores responsáveis pela alternância de produções anuais, influenciando no balanço de produção, pois contribui com perdas ou ganhos. Segundo Saldanha (2009), as relações entre os elementos do clima e a produção agrícola instituem uma relação complexa, uma vez que os fatores do ambiente podem afetar o crescimento e o desenvolvimento da soja em suas diversas fases de cultivo. Em resumo o clima é o fator que exerce maior ação limitante às máximas produtividades e, agrava-se a isto, a dificuldade de previsão de ocorrências climáticas adversas, principais fatores de risco e de insucesso na exploração das principais culturas.

Um dos pontos afetados pela variabilidade climática é a disponibilidade hídrica do solo, cuja deficiência de umidade,

pode limitar o desenvolvimento da planta através da redução na quantidade de CO_2 . Uma vez com deficiência hídrica, os estômatos das folhas fecham-se diminuindo a absorção de CO_2 utilizado na fotossíntese. Neste concerne, é que se destaca a importância de ser avaliado o fluxo de CO_2 de um cultivo, como medida complementar para avaliação do comportamento da cultura em relação a um comportamento padrão de desenvolvimento em cada fase, monitorando-se, assim, se o crescimento do cultivo desenvolve-se de forma adequada a garantir produtividade.

Torre Micrometeorológica

Estudos microclimáticos fornecem subsídios na busca da compreensão a cerca das trocas de CO_2 e vapor d'água, bem como, das trocas de energia ocorrentes entre a superfície e a atmosfera. Diante desta realidade para que se possa efetuar a análise do comportamento do CO_2 sobre uma lavoura soja, adotou-se a metodologia que se baseia em medições realizadas por uma torre micrometeorológica que calcula as trocas gasosas na interface superfície-atmosfera, considerando o ecossistema como um todo. Os fluxos de CO_2 experimental, obtidos pela torre micrometeorológica, referem-se dados referentes a períodos de 30 minutos, utilizando-se o Método Eddy-Covariance. O referido método, a partir de sensores específicos, adota uma frequência de medições da velocidade vertical do vento

juntamente com medições da concentração do dióxido de carbono sobre um ponto acima da superfície, obtendo, desse modo, leitura dos fluxos de CO_2 . Segundo Webler (2011), a medição da concentração de CO_2 é realizada por um analisador de gás de circuito aberto, enquanto a medição da velocidade do vento é

feita por um anemômetro sônico, que obtém medidas de velocidade do vento na componente zonal (u), componente meridional (v) e componente vertical (w), conforme indicado na figura 2.

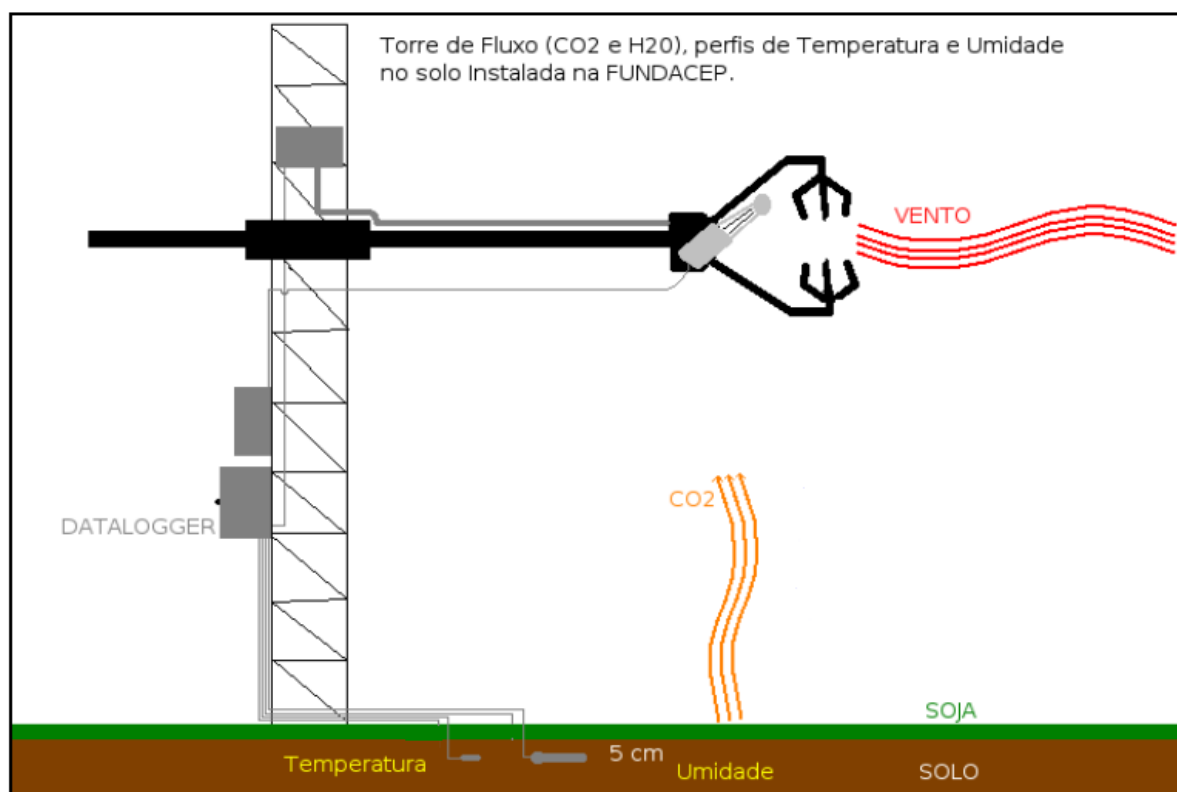


Figura 2. Esquema de funcionamento de uma torre micrometeorológica.

Fonte: Escobar (2008).

Modelo de Superfície

O modelo adotado neste estudo foi o (Simple Biosphere Model 2) SiB2 desenvolvido por SELLERS et al (1996a, b). Sua estrutura interna é constituída por quatro sub-rotinas ou módulos, segundo os quais realiza seus cálculos, sendo estes hierarquizados da seguinte maneira: módulo aerodinâmico, módulo de transferência

radiativa, módulo de difusão hidráulica do solo e módulo de fotossíntese e condutância estomática. Para a simulação dos fluxos de superfície, o modelo utiliza algumas variáveis meteorológicas que são adotadas como condições de contorno, as quais definem o estado físico da atmosfera a cada tempo. Tais variáveis meteorológicas utilizadas são a temperatura do ar (T_m), a pressão de vapor

d'água (em), a velocidade do vento (um) e a precipitação (P), bem como, os fluxos de radiação incidente ($F_{\lambda,\mu}$): visível (direto e difuso), infravermelho próximo (direto e difuso) e infravermelho termal (somente difuso). Neste trabalho foram utilizadas as variáveis obtidas pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 200 metros do sítio experimental.

O SiB2 utiliza também distintos parâmetros que são responsáveis pela definição do bioma em estudo. Dentre estes, têm-se os parâmetros morfológicos, os fisiológicos, as propriedades físicas do solo e as propriedades ópticas do solo e da vegetação. São estes os parâmetros que devem ser calibrados para que o modelo represente da melhor maneira possível os fluxos de carbono da área em estudo. Para este procedimento, optou-se por adotar a calibração manual, uma vez que esta permite que se tenha maior conhecimento a cerca de qual parâmetro exerce maior influência na obtenção dos fluxos de CO_2 , sendo este processo realizado de acordo com os módulos sequenciais do modelo. Para a avaliação dos fluxos simulados, efetuou-se sua comparação com dados experimentais obtidos pela torre micrometeorológica referida no item 2.3.

Resultados e Discussão

A calibração de um modelo de superfície constitui-se em um processo iterativo em que os valores dos parâmetros são

modificados e seus efeitos nos resultados são avaliados repetidamente até que o resultado simulado reproduza a melhor associação com o resultado observado. Cada alteração nos valores dos parâmetros foi denominada de conjunto, desse modo, obtiveram-se parâmetros com variados conjuntos. Convém destacar que os valores assumidos nos conjuntos de cada um dos parâmetros foram baseados na literatura. Para o julgamento dos resultados realizou-se avaliações baseadas na medida de desempenho dada pelo coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS), que representou o comportamento do fluxo de CO_2 simulado com relação ao comportamento do fluxo de CO_2 observado. O referido coeficiente é dado pela equação 1.

$$NS = 1 - \frac{\sum \left(\text{CO}_{2_{\text{exp}}} (t) - \text{CO}_{2_{\text{sim}}} (t) \right)^2}{\sum \left(\text{CO}_{2_{\text{exp}}} (t) - \overline{\text{CO}_{2_{\text{exp}}}} \right)^2}$$

equação 1

onde $\text{CO}_{2_{\text{exp}}} (t)$ é o fluxo de CO_2 observado no tempo t, enquanto $\text{CO}_{2_{\text{sim}}} (t)$ é o fluxo de CO_2 calculado no tempo t. Este coeficiente pode variar de menos infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste entre o fluxo calculado e o observado. Valores maiores que 0,75 sinalizam um bom ajuste do modelo (Krysanova et al, 1998). Contudo, de acordo com Collicshon (2001), o desempenho de um modelo pode ser considerado adequado e bom se o valor de NS superar 0,75 e

considerado aceitável se o valor de NS ficar entre 0,36 e 0,75.

A simulação dos fluxos de CO₂ foi realizada com base no período de 01 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2009, referindo-se ao ano-safra de 2008/2009. Para o aquecimento do modelo adotou-se o spin up equivalente a 40 anos de dados horários, o qual foi obtido a partir da repetição cíclica de 20 vezes os dados de 2008 e 2009. A avaliação dos fluxos simulados foi embasada nos dados experimentais obtidos pela torre micrometeorológica, contudo, algumas falhas nestes foram observadas. Em razão deste problema, para a validação dos fluxos simulados adotou-se o período de 05 a 17 de fevereiro de 2009, que totaliza 288 horas, apresentando falhas em apenas 9 horas, as quais estão distribuídas ao longo de diversos dias dentro do citado período. Ressalta-se que

o período citado equivaleu ao estágio de floração da soja.

O processo de calibração foi iniciado pelo módulo aerodinâmico, sendo testados os parâmetros morfológicos que tratam da altura da base do dossel (Z1), altura do topo do dossel (Z2), fração de cobertura vegetal (V) e distribuição do ângulo foliar (XL). No que tange os parâmetros Z1 e Z2, verifica-se que o conjunto 2 representou o melhor resultado, conforme indicado pela medida de desempenho (NS) (tabela 1). Observa-se que valores maiores representaram melhorias no valor deste coeficiente, o que pode ser explicado pelo fato de se referirem às características morfológicas da cultura e, considerando-se que o período de avaliação adotado correspondeu ao estágio de floração, torna-se compreensível que os maiores valores correspondam a melhorias na medida de desempenho.

Tabela 1. Valores adotados na calibração da altura da base do dossel (Z1) e altura do topo do dossel (Z2).

<i>Conjunto</i>	<i>Z1 (m)(base)</i>	<i>Z2 (m)(topo)</i>	<i>NS</i>
1	0,7	1,0	0,3859
2	0,7	1,2	0,4048
3	0,15	1,2	0,3968
4	0,15	1,0	0,3723
5	0,5	1,2	0,3795
6	0,99	1,2	0,4047

Na avaliação do parâmetro V, constata-se que o melhor resultado foi obtido com o conjunto 3 (tabela 2), novamente observando-se que valores maiores representaram melhorias na medida de desempenho. Para

compreensão desta característica avalia-se o ciclo da cultura, que durante sua fase inicial as folhas ainda estão em crescimento, assim, a fração de cobertura do dossel apresenta valores menores que vão aumentando

conforme a cultura atinge seu desenvolvimento máximo, e durante a fase de floração, cujo desenvolvimento máximo foi

alcançado, o dossel apresenta maior fração de cobertura, uma vez que as estruturas das folhas já se encontram bem desenvolvidas.

Tabela 2. Valores adotados na calibração da fração de cobertura vegetal (V).

<i>Conjunto</i>	<i>V</i>	<i>NS</i>
1	0,70	0,4174
2	0,80	0,4419
3	0,9	0,4564
4	0,68	0,4107
5	0,76	0,4328
6	0,62	0,3214

Por fim em análise a X_L , nota-se um resultado mais satisfatório com o conjunto 1. Este parâmetro morfológico indica a orientação das folhas dentro do dossel, logo, o

menor valor representou melhor resultado, pois a distribuição do ângulo foliar interfere na interceptação da radiação, importante para o fluxo de CO_2 (tabela 3).

Tabela 3. Valores adotados na calibração do parâmetro de distribuição do ângulo foliar (X_L).

<i>Conjunto</i>	X_L	<i>NS</i>
1	0,2	0,63341
2	0,5	0,63307
3	0,7	0,63297
4	0,45	0,63311
5	0,35	0,63321

Na figura 3 demonstra-se a variação do fluxo de CO_2 experimental com relação à variação do fluxo de CO_2 simulado após a calibração dos parâmetros Z_1 , Z_2 , V , X_L . Nota-se que ocorreu um ajuste do fluxo simulado

com relação ao observado pela torre micrometeorológica, conforme se calibravam os parâmetros e estes eram fixados em seu melhor valor.

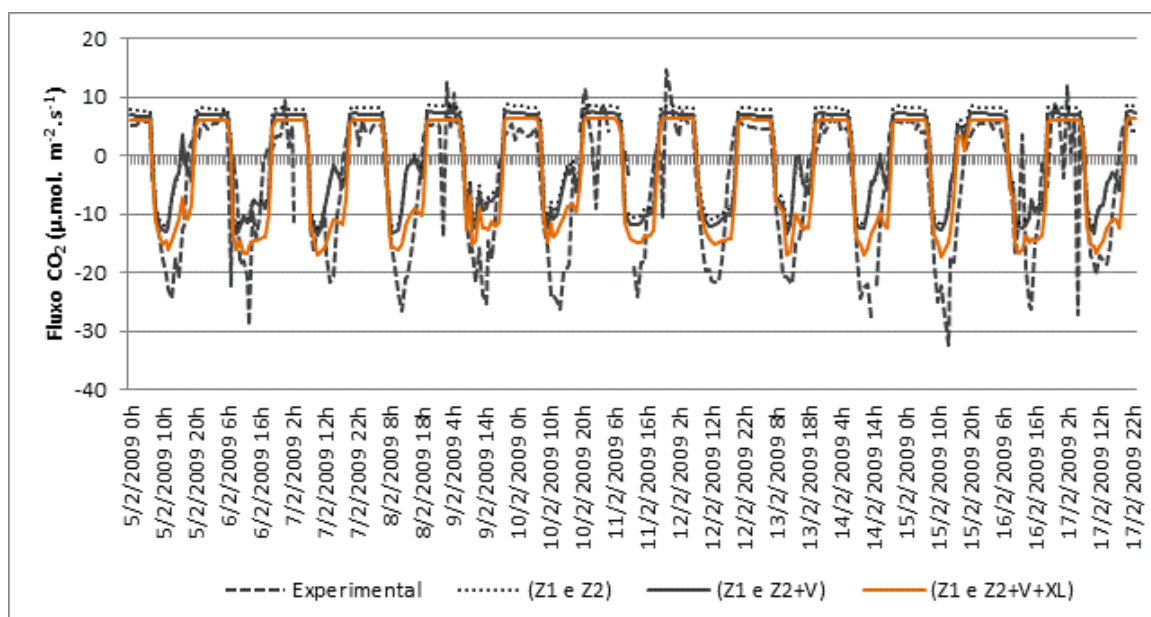


Figura 3. Comparativo entre os fluxos de CO₂ experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo aerodinâmico, cujos valores foram fixados ao longo do processo.

O segundo módulo calibrado foi o de transferência radiativa, cujo parâmetro avaliado foi a reflectância da folha viva no visível (α_v, l). Em análise à tabela 4, verifica-se que o melhor resultado foi obtido com o conjunto 4, sendo necessário, para a sua compreensão, considerar, que a validação da calibração foi realizada para o período que equivaleu à floração da cultura de soja, o que significa que nesta época o cultivo já se encontrava em seu desenvolvimento máximo, o que reflete na partição dos fluxos radiativos incidentes. Convém destacar que a produção de biomassa está relacionada com a quantidade de energia absorvida, desse modo, durante sua fase de crescimento a soja passa a absorver mais radiação que refletir,

constatando-se, assim, que a reflectância sofrerá variações em seus valores ao longo do ciclo, sendo também diretamente influenciada pelo espectro eletromagnético. De acordo com ALMEIDA (2009), sabe-se que a reflectância da folha verde da soja, na faixa do visível, mantém-se inferior a 15% ao longo do seu ciclo, sendo que os menores valores são observados durante sua fase de crescimento e os maiores valores passam a ser observados durante seus períodos finais, onde já atingiu a altura máxima e passa a concentrar suas energias na floração, enchimento dos grãos para posterior maturação, o que torna compreensível o melhor coeficiente de Nash e Sutcliffe ter sido indicado pelo conjunto 4, que representou o maior valor de reflectância.

Tabela 4. Valores adotados na calibração da reflectância da folha viva no visível (α_v, l).

<i>Conjunto</i>	<i>α_v, l</i>	<i>NS</i>
1	0,05	0,6284
2	0,10	0,6384
3	0,13	0,6443
4	0,15	0,6471

A figura 4 indica o ajuste do fluxo de CO₂ simulado ao observado, após a calibração deste parâmetro.

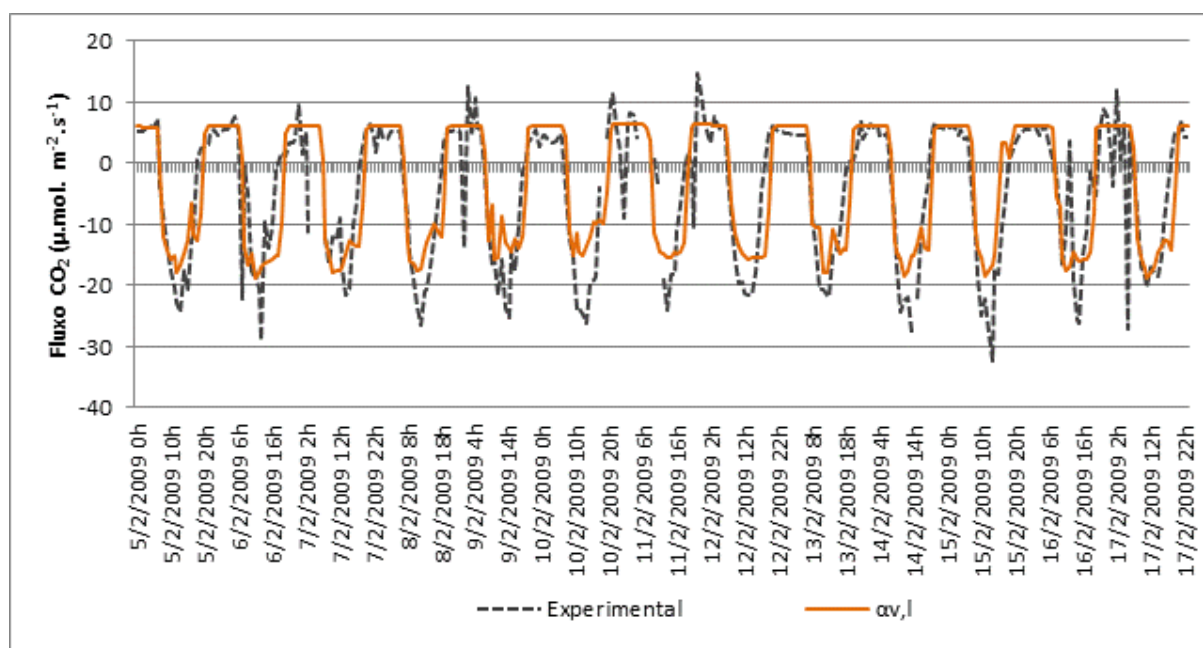


Figura 4. Comparativo entre os fluxos de CO₂ experimental e o simulado após a calibração do parâmetro de reflectância da folha viva no visível.

O terceiro módulo calibrado foi o de difusão hidráulica do solo, cujos parâmetros testados foram: porosidade do solo (θ_s), profundidade individual das camadas (z_{depth}) e expoente de umidade do solo (bee). Ressalta-se que o modelo considera o solo

dividido em três camadas verticais que representam a zona de evaporação livre (D1), a zona de raízes (D_r) e a zona de drenagem profunda (D_t). Desse modo, a umidade calculada para o ambiente é o resultado da interação das propriedades físicas nestas

camadas. Com relação a θ_s , verifica-se que o melhor resultado foi indicado pelo conjunto 4, em que é possível observar que quanto maior o valor atribuído a este parâmetro, melhor torna-se a medida de ajuste (NS) (tabela 5). Destaca-se que a porosidade do solo exerce influência direta na transferência de CO_2 do solo para a atmosfera, sendo esta transferência

conhecida como efluxo de CO_2 do solo. Maiores valores de porosidade indicam ao modelo que melhor se desenvolve o processo de respiração neste ambiente realizado pela atividade microbiana e incrementado pela respiração das raízes, adequando o fluxo de carbono simulado ao experimental.

Tabela 5. Valores adotados na calibração da porosidade do solo (θ_s).

Conjunto	θ_s ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	NS
1	0,210	0,3476
2	0,455	0,4081
3	0,468	0,4098
4	0,475	0,4107

Em seguida verificou-se o resultado da calibração de z_{depth} , único dos três parâmetros que adota diferentes valores para as camadas do solo. O melhor resultado foi obtido com o conjunto 2 (tabela 6), sendo possível observar que a segunda camada parece exercer maior influência na determinação destes fluxos que as demais,

sendo esta camada considerada a zona de raízes, lembra-se que o processo de respiração do solo decorre tanto dos micro-organismos presentes neste ambiente, quanto da respiração das raízes, reforçando a teoria de que a segunda camada exerce maior influência.

Tabela 6. Valores adotados na calibração da profundidade individual das camadas do solo (z_{depth}).

Conjunto	$z_{\text{depth}}(\text{m})$ (D_1)	$z_{\text{depth}}(\text{m})$ (D_r)	$z_{\text{depth}}(\text{m})$ (D_t)	NS
1	0,5	0,2	0,33	0,63433
2	0,5	0,23	0,36	0,63436
3	0,2	0,17	0,30	0,63428
4	0,25	0,2	0,35	0,63429

Por fim avaliou-se os resultados de *bee*, cuja melhor medida de desempenho foi obtida com o conjunto 1 (tabela 7). Nota-se que maiores valores representam um solo saturado em água, ocasionando prejuízo tanto à atividade microbiana, quanto à respiração das raízes. Em contrapartida valores muito baixos

prejudicam a simulação do fluxo de carbono, uma vez que está atrelado à deficiência de umidade que pode limitar estes fluxos, pois o solo com pouca disponibilidade hídrica estimula o fechamento dos estômatos das folhas, logo prejudica as trocas de CO₂ com a atmosfera.

Tabela 7. Valores adotados na calibração do expoente de umidade do solo (*bee*).

<i>Conjunto</i>	<i>bee</i>	<i>NS</i>
1	2,05	0,6351
2	1,05	0,6351
3	6,05	0,6351

A determinação da profundidade de cada camada, bem como a consideração ideal do expoente de umidade e da porosidade do solo, são condicionantes importantes na calibração desta sub-rotina por se tratarem de propriedades físicas que estão atreladas ao processo de respiração do solo. De acordo com Coelho (2005), a respiração do solo é resultado de dois processos: produção de CO₂, principalmente durante a respiração das raízes e dos micro-organismos, e transporte de CO₂ para atmosfera. O referido autor reforça ainda que a presença de ar no solo é importante, pois leva ao ambiente, o oxigênio (O₂) para a respiração da biota e consequentemente mineralização da matéria orgânica, sendo que

a presença de dióxido de carbono também é importante para os organismos autotróficos do solo. Contudo, mesmo verificando a importância de cada uma das propriedades físicas testadas durante a calibração, constata-se que a porosidade do solo apresentou contribuições mais significativas à adequação desta sub-rotina ao ajuste dos fluxos de CO₂ simulados ao fluxo observado. Contudo, embora tendo representado uma contribuição mínima à calibração, quando os melhores valores de (*zdepth*) e (*bee*) foram adotados em conjunto com o melhor valor referente a (Θ_s) obteve-se um ajuste maior nas curvas do fluxos simulados em comparação ao experimental, conforme figura 5.

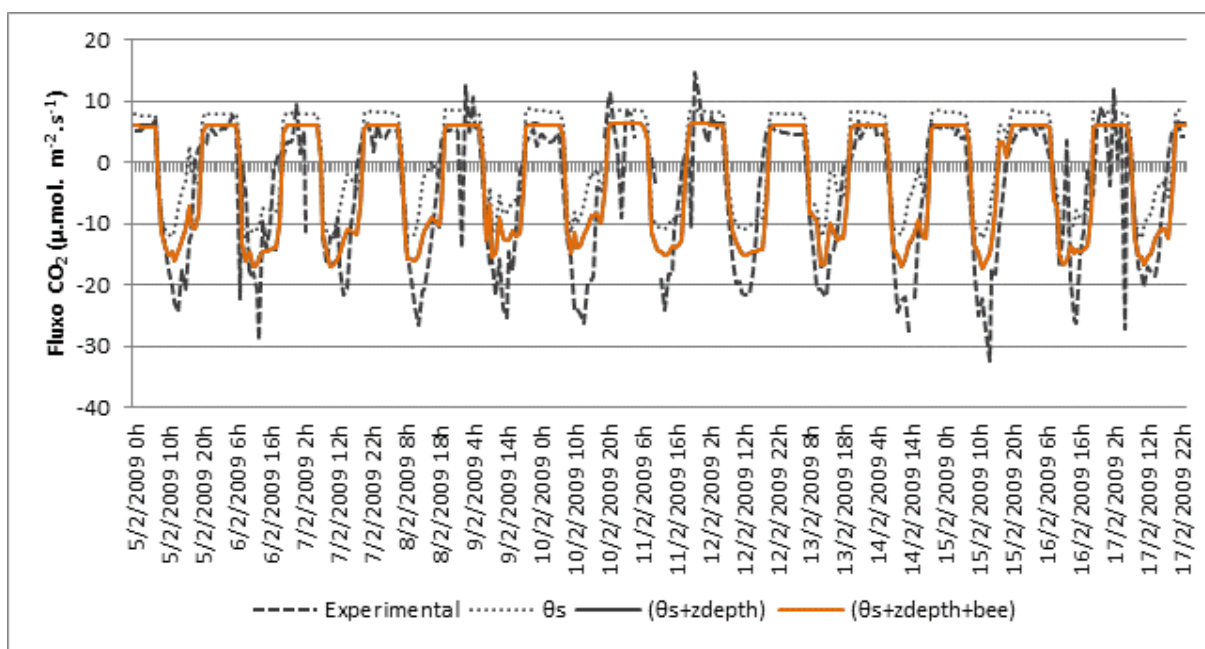


Figura 5. Comparativo entre os fluxos de CO₂ experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo de difusão hidráulica do solo, cujos valores foram fixados ao longo do processo.

Finalizando o processo de calibração avaliou-se os parâmetros referentes ao quarto módulo, o de fotossíntese e condutância estomática. Nesta sub-rotina foi avaliado o índice de área foliar (IAF), a condutância estomática mínima(B) e a temperatura crítica para a respiração foliar (trdm). Os valores adotados nos testes com o IAF, demonstrou melhor resultado com o conjunto 6 (tabela 8). Para sua avaliação foi necessário considerar tanto os períodos de desenvolvimento da soja, quanto da aveia preta utilizada na rotação com a primeira cultura. Destaca-se que a cultura de soja foi desenvolvida durante o período de verão, ocorrendo sua semeadura em 28 de novembro de 2008 e sua colheita em 15 de abril de 2009 e o cultivo de aveia preta,

desenvolvido durante o inverno, com semeadura em 15 de junho de 2009 e colheita em 06 de novembro do mesmo ano, salientando-se que a aveia teve de ser replantada em 28 de julho em razão de problemas ocasionados por geada. Assim, verifica-se que o conjunto 6 representou melhor o IAF de ambos os cultivos por ter adotado os maiores valores para os meses de janeiro a abril (referentes à soja) e para os meses de agosto a novembro (referentes à aveia), enquanto que para os meses de pousio e semeadura não foram adotados valores tão baixos, uma vez que, mesmo estando em pousio, ainda assim pode ocorrer o crescimento de vegetação que pode contribuir de forma mínima com este índice.

Tabela 8. Valores adotados na calibração do índice de área foliar (IAF).

<i>Conjunto</i>	<i>IAF (m².m⁻²)</i>												
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>NS</i>
1	2,871	3,000	3,000	3,000	0,504	0,500	0,782	0,893	0,781	0,882	1,504	2,500	0,3821
2	2,871	3,000	3,000	3,000	0,000	0,000	0,000	2,893	3,781	3,882	0,000	0,000	0,3184
3	2,871	3,000	3,000	3,000	0,504	0,500	0,782	0,793	0,681	0,682	1,700	2,600	0,3191
4	3,871	5,581	5,600	5,000	0,504	0,500	0,782	3,871	5,581	5,600	5,000	0,500	0,3879
5	3,871	5,581	5,600	5,000	0,504	0,500	0,782	3,871	5,581	5,600	5,000	0,500	0,3979
6	4,871	5,781	5,800	5,500	0,504	0,500	0,782	3,871	5,581	5,600	5,000	0,500	0,4048
7	4,871	5,781	5,800	5,500	0,104	0,100	0,150	3,871	5,581	5,600	5,000	0,100	0,3987

Em seguida avaliou-se a condutância estomática mínima, responsável pelas trocas de CO₂ e água, ocorrentes através dos estômatos, sendo o mecanismo que controla o grau de abertura destes (Paiva, 2005). Com base na tabela 9, nota-se que o conjunto 5 representou o melhor resultado de acordo com NS. Apesar da pequena variação do valor de

NS entre os conjuntos testados, à proporção que se aumentava o valor adotado, maior tornavam-se os valores desta medida de desempenho. Avalia-se, portanto, que valores muito pequenos, reduzem a capacidade mínima de abertura dos estômatos presumida pelo modelo, prejudicando assim o desempenho da simulação dos fluxos.

Tabela 9. Valores adotados na calibração do parâmetro de condutância estomática mínima (B).

<i>Conjunto</i>	<i>B (mol.m².s⁻¹)</i>	<i>NS</i>
1	0,05	0,6038
2	0,08	0,6090
3	0,10	0,6116
4	0,15	0,6162
5	0,20	0,6190

Por fim, avaliou-se os testes aplicados à temperatura crítica para respiração foliar, cujo melhor resultado foi observado no conjunto 3 (tabela 10). Mesmo que a variação do coeficiente de Nash e Sutcliffe tenha sido mínima entre os conjuntos, nota-se que ocorre certa tendência relacionada à variação dos valores atribuídos ao parâmetro, observando-se que os valores mais elevados retornaram um NS mais baixo, enquanto o menor valor,

adotado no conjunto 3, resultou em uma melhora na medida de desempenho. Presume-se, portanto, que mesmo que este parâmetro tenha representado uma variação mínima da medida de desempenho, as temperaturas menos elevadas adequaram-se mais a sua calibração, pois ocasionam menos alterações na respiração foliar o que reflete na simulação dos fluxos, uma vez que este é um dos fatores que afetam a atividade fotossintética, pois o

vegetal procura adequar sua respiração foliar trocas gasosas ocorrentes. às condições do ambiente, alterando, assim as

Tabela 10. Valores adotados na calibração do parâmetro de temperatura crítica para a respiração foliar (trdm).

<i>Conjunto</i>	<i>trdm (K)</i>	<i>NS</i>
1	328	0,6828
2	300	0,6884
3	280	0,6943
4	290	0,6938
5	288	0,6941

A figura 6 demonstra a variação do fluxo de CO₂ experimental com relação a estes fluxos simulados após a calibração de cada um dos parâmetros deste módulo. Observa-se que houve melhoria na adequação destes

fluxos simulados com relação ao observado, lembrando que a cada parâmetro calibrado, todos os anteriores (inclusive aqueles referentes aos demais módulos) já haviam sido fixados em seu melhor valor.

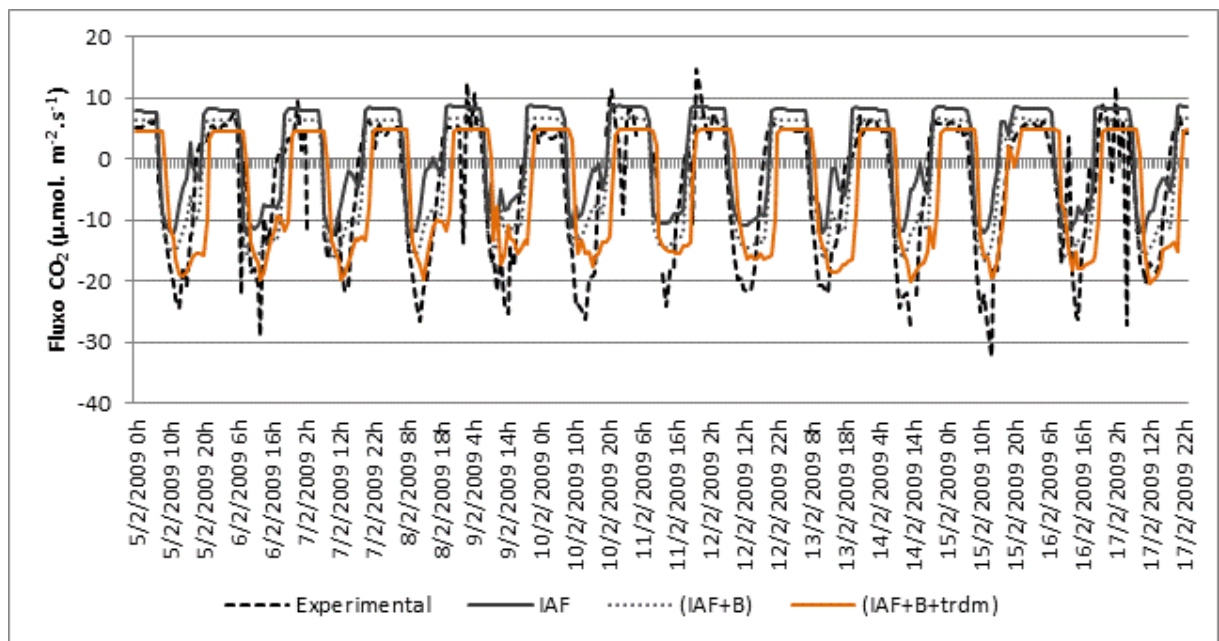


Figura 6. Comparativo entre os fluxos de CO₂ experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo de fotossíntese e condutância estomática, cujos valores foram fixados ao longo do processo.

A calibração dos módulos não foi realizada em todos os parâmetros a eles pertencentes. Optou-se por calibrar aqueles que obtiveram maior sensibilidade frente à medida de desempenho dada por NS. Para esta conclusão realizou-se previamente um breve teste com diversos parâmetros do modelo, obtendo-se para cada um deles, um valor referente ao coeficiente de Nash e Sutcliffe, e, a partir deste coeficiente, selecionou-se os parâmetros que seriam calibrados neste estudo. Como análise final do processo de calibração, pode-se dizer que dentre os parâmetros, considerando-se todos os módulos, aqueles que exerceram maior influência na adequação dos fluxos de CO₂ simulados com relação ao fluxo experimental, foram: altura da base do dossel (Z_1), altura do topo do dossel (Z_2), fração de cobertura vegetal (V), porosidade do solo (θ_s), índice de área foliar (IAF) e temperatura crítica para respiração foliar ($trdm$). Ressaltando-se que (Z_1 , Z_2 e V) tratam dos parâmetros morfológicos referentes ao módulo

aerodinâmico; (θ_s) refere-se à propriedade física do solo, trabalhada no módulo de difusão hidráulica do solo; enquanto (IAF e $trdm$) referem-se ao módulo de fotossíntese e condutância estomática mínima, onde o primeiro representa um parâmetro variante com o tempo e o segundo é um parâmetro fisiológico.

Para uma avaliação qualitativa da importância da calibração do modelo, plotou-se a figura 7 que exhibe um comparativo entre o fluxo de CO₂ experimental (aquele obtido a partir da torre micrometeorológica) o qual consta denominado “experimental”; o fluxo de CO₂ simulado antes de ser realizada a calibração dos parâmetros (no qual se manteve os valores *default* referente aos parâmetros de cada módulo, conforme SELLERS et al (1996b)), sendo esta simulação denominada de “simulação pré-calibração”; e por fim comparou-se juntamente os fluxos simulados após a calibração dos parâmetros, sendo denominada de “simulação pós-calibração”.

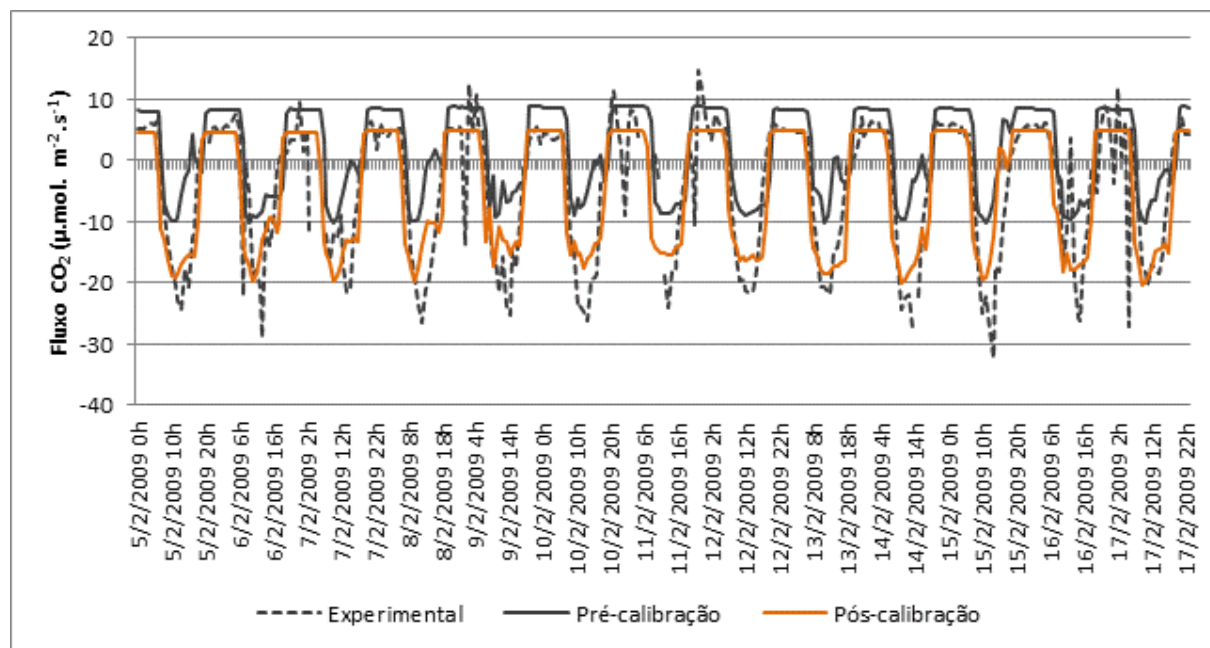


Figura 7. Comparativo entre os fluxos de CO₂ experimental e os simulados antes do processo de calibração e após a calibração dos parâmetros.

Avaliando-se a figura 7, verifica-se que a calibração resultou em um melhor ajuste do fluxo de CO₂ simulado, quando comparado ao obtido experimentalmente. Isto é perceptível ao se avaliar a diferença entre os comportamentos dos fluxos simulados antes do processo de calibração (pré-calibração) e após este (pós-calibração). Contudo, mesmo obtendo uma

melhoria significativa (conforme indicado pelo coeficiente de Nash e Sutcliffe que se encontram expressos na tabela 11), ainda assim, o modelo tende a subestimar os valores dos fluxos. Durante o ciclo diurno os valores foram mais subestimados que aqueles que representam o ciclo noturno, cujos fluxos simulados acompanharam melhor o observado.

Tabela 11. Coeficiente de Nash e Sutcliffe referente às simulações antes da calibração (pré-calibração) e após este processo (pós-calibração).

<i>Desempenho do modelo na simulação do fluxos de CO₂</i>	<i>NS</i>
Pré-calibração	0,29
Pós-calibração	0,69

Conclusões

Em síntese constata-se que apesar de terem sido calibrados apenas alguns parâmetros do modelo, ainda assim esse processo permitiu que se obtivesse um ganho expressivo na qualidade da simulação. Portanto, com a calibração do modelo SiB2 para a cultura de soja no município de Cruz Alta, tem-se uma substancial melhoria na estimativa dos fluxos em questão, sempre considerando que apesar da melhoria proporcionada pela calibração, ainda assim, o modelo tende a subestimar os fluxos de CO₂, principalmente durante o período diurno. Salienta-se, contudo, que em processos de modelagem é difícil atingir valores perfeitos na adequação ao dado observado, portanto, com uma calibração adequada, verifica-se que o SiB2 pode ser adotado satisfatoriamente em estudos que visem à simulação de fluxos de CO₂.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES.

Referências

- Almeida, T.S. 2008. Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo do solo. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 100f.
- Collischonn, W. Simulação hidrológica para grandes bacias. 2001. Tese de doutorado—Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 270f.
- Foley, J.A. et al. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, v.10, p.603-628.
- Krysanova, V. et al. 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds. *Ecol. Model.*, 106, 261-289.
- Saldanha, C. B. 2009. Previsão de longo prazo da umidade do solo na bacia do rio Uruguai. Tese de doutorado (Doutorado em Hidrologia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 161 f.
- Sellers, P.J et al. 1986, A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of the atmospheric sciences. American meteorological society*. V.43, NO.6, p.505-531.
- Sellers, P.J., et al. 1996a. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Climate*. 9, 676-705.
- Sellers, P.J., et al. 1996b. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Climate*. 9, 706-737.
- Webler, G. 2011. Validação do modelo Agro-Ibis para um sítio experimental de soja no Rio Grande do Sul. 2011. 60f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.