

**Cálculo do fluxo de CO₂
com modelo de interação
superfície-vegetação-atmosfera ISBA**

André Luís Diniz dos Santos

DISSERTAÇÃO/TESE APRESENTADA AO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Programa: PPGEA

Orientador: Prof. Maurício Felga Gobbi

Curitiba, 26 de julho de 2016

**Cálculo do fluxo de CO₂
com modelo de interação
superfície-vegetação-atmosfera ISBA**

Esta versão final da dissertação contém as correções e alterações sugeridas pela Comissão Julgadora durante a defesa da versão original do trabalho, realizada em 15/07/2016.

Santos, André Luís Diniz dos

Cálculo do fluxo de CO₂ com modelo de interação superfície-vegetação-atmosfera ISBA / André Luís Diniz dos Santos. – Curitiba, 2016.

156 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia ambiental.

Orientador: Maurício Felga Gobbi

Bibliografia: p. 146-156

1. Dioxido de carbono. 2. Modelos matemáticos. 3. Meio ambiente. I. Gobbi, Maurício Felga. II. Título.

CDD 628

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDRE LUIS DINIZ DOS SANTOS**, intitulada: "**Cálculo do fluxo de CO₂ com modelo de interação superfície-vegetação-atmosfera ISBA**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

Curitiba, 15 de Julho de 2016.



Prof MAURÍCIO FELGA GOBBI
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



Prof NELSON LUÍS DA COSTA DIAS
Avaliador Interno (UFPR)



Prof JORGE MACHADO DAMAZIO

Dedicatória

Dedico esta dissertação ao meu avô que faleceu meses antes do meu ingresso neste programa de pós-graduação (Raimundo Nonato dos Santos † 23/10/2013) e a minha avó (Marina Mendes dos Santos † 15/01/2015) que veio a falecer logo após.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha esposa Caroline da Silva Marchini dos Santos e a meu filho Andrew Marchini Diniz dos Santos por estarem sempre ao meu lado mesmo nos momentos mais difíceis, me apoiando e incentivando, sendo entre tudo a razão do meu viver. Também sou grato a minha vó Adelaide, minha mãe Ana Zulmira, meu pai Djalma e aos meus irmãos Bruno, Lucas, Michel e Tatiana.

Agradeço imensamente ao meu orientador professor Maurício Gobbi por estar me guiando desde a época da graduação, pelo conhecimento a mim passado nas disciplinas da graduação e da pós-graduação, bem como em todo período de sua orientação. Sem o seu ensinamento nada disso seria possível.

Meus agradecimentos a todos os professores da graduação e em especial da pós-graduação pelas horas em sala de aula em que tive a honra de aprender com suas experiências técnico-científicas e de vida. Dentre estes em especial aos professores Nelson Dias, Jorge Damazio e Michael Mannich, por terem aceitado fazer parte das bancas julgadoras de qualificação e defesa, pelas correções sugeridas, pelas dicas e sugestões que vieram a acrescentar e melhorar o conteúdo da dissertação.

Meus reconhecimentos a todos os professores e alunos que participaram do desenvolvimento do modelo ISBA até aqui, em especial ao professor Dornelles Vissotto Junior. Também aos colegas que em conversas informais sempre me ajudaram prontamente, bem como me incentivaram e apoiaram. Dentre estes o professor Fernando Armani, Lucas Hoeltgebaum e Angelo Breda.

Expresso também a minha gratidão a todos os funcionários do PPGEA, PPGERHA, PPGMNE, CESEC, SIMEPAR e UFPR em geral, com os quais convivo desde a época da graduação.

Epígrafe

Oração do estudante

Mestre e fonte de todos os dons!
Eu te agradeço
pela oportunidade de poder estudar!
Estudar é uma dádiva, uma arte,
uma trajetória de enriquecimento cultural
e de constantes desafios,
que exigem dedicação e esforço.
Sou um estudante feliz
em busca de novos conhecimentos,
disposto a desenvolver meus talentos,
seguir uma vocação e percorrer o glorioso
caminho da aprendizagem e realização.
Senhor, inspira-me na concentração
dos estudos e na frequência às aulas.
Dá-me sabedoria e prudência
no decorrer dos exames.
Abençoa os meus professores
e todos os estudantes.
Conduze-me pelo caminho do bem
para prosperar nos meus sonhos
e construir um futuro melhor. Amém!

Autor desconhecido.

Resumo

DOS SANTOS, A. L. D. **Cálculo do fluxo de CO₂ com modelo de interação superfície-vegetação-atmosfera ISBA**. 2016. 200 f. Tese (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2016.

Este trabalho implementa primeiramente um método para calcular o fluxo de gás carbônico em uma plantação de soja, utilizando uma versão modificada por Vis-sotto (2003) do modelo de transferência entre superfície-vegetação-atmosfera SVAT ISBA (Noilhan e Planton, 1989). O modelo ISBA consiste em seis equações diferenciais ordinárias prognósticas para temperatura na superfície, temperatura média na camada de raízes, umidade na camada superficial do solo, umidade média na camada de raízes, umidade média na camada de sub-raízes e umidade retida na vegetação, utilizando como forçantes a temperatura do ar, radiação solar incidente, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação. O modelo calcula fluxos de calor, temperaturas e umidades do solo. O cálculo da evapotranspiração utiliza parâmetros puramente físicos, pois havia apenas interesse na liberação de água para evapotranspiração. Adicionalmente foi acoplado o módulo A-gs proposto por Jacobs (1994) para descrever os processos fisiológicos na escala das folhas, levando em consideração a assimilação líquida de gás carbônico pela vegetação. Este novo modelo denominado de ISBA-A-gs, teve ainda nesta pesquisa módulos inseridos para o cálculo da respiração noturna da vegetação e estresse hídrico no solo. O modelo foi calibrado, utilizando-se duas séries de dados robustas de medições de campo no estado do Paraná e aplicado posteriormente com sucesso em uma região na Argentina onde existem dados do fluxo de CO₂ medido sobre uma plantação de soja.

Palavras-chave: fluxo CO₂, modelo numérico, soja.

Abstract

DOS SANTOS, A. L. D. **Calculation of CO₂ flux with surface-vegetation-atmosphere interaction model ISBA**. 2016. 200 f. Thesis (Master) - Graduate Program in Environmental Engineering, Federal University of Paraná, Paraná, 2016. In this dissertation we implement a model to calculate the carbon dioxide flux in a soybean culture, using a modified version of the surface-vegetation-atmosphere transfer model (SVAT) ISBA (Noilhan e Planton, 1989). The model consists of a six ordinary differential equations for the surface temperature, temperature of root soil layer, moisture of soil surface, moisture of root soil layer, moisture of the sub-root soil layer. and moisture retained on the vegetation canopy, and it is forced by air temperature, solar radiation, air relative humidity, wind speed and precipitation. As in the original ISBA the model also predicts heat and moisture fluxes. While the original ISBA computes evapotranspiration with purely physical terms, the present model couples ISBA with the module A-gs proposed by Jacobs (1994) to describe the physiological processes in the leaves, taking into account the net assimilation of carbon dioxide by vegetation. This new model called ISBA-A-gs is similar to Calvet et al. (1998), with the inclusion of several improvements. The model was calibrated using two data series of measurements made in the state of Paraná and was successfully applied to a soybean field in Argentina where comparisons with the CO₂ fluxes were made.

Keywords: CO₂ flux, numeric model, soy.

Sumário

1	Introdução	31
2	Revisão Bibliográfica	34
2.1	Breve histórico do modelo ISBA	36
3	Modelo Matemático de Interação Superfície-Atmosfera	40
3.1	Sistema de equações ISBA	40
3.2	Modelagem do fluxo de CO ₂	54
3.2.1	Módulo A-gs	57
3.2.2	Módulo gs	67
4	Aplicações dos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs	69
4.1	Aplicações em SLOU, estado do Paraná	70
4.1.1	Experimento de campo	70
4.1.2	Calibração	78
4.2	Aplicação em CMAYO, Argentina	102
4.2.1	Experimento de campo em CMAYO	102
4.2.2	Simulação com ISBA-gs	106
4.2.3	Simulação com ISBA-A-gs	112
4.3	Resumo e discussão dos resultados	118
4.4	Modelagem alternativa da umidade relativa na superfície do solo . . .	119
4.5	Aperfeiçoamento da respiração	126
5	Conclusões	129
5.1	Recomendações	131

A	Análises estatísticas dos modelos em SLOU	133
A.1	ISBA-g _s	133
A.2	ISBA-A-g _s	133
B	Análises estatísticas dos modelos na Argentina	142
B.1	ISBA-g _s	142
B.2	ISBA-A-g _s	142

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade SI
a_{eq}	Parâmetro adimensional	
A_m	Taxa de fotossíntese na saturação de luz	$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
A_{min}	Taxa residual de fotossíntese	$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$A_{m,max}$	Capacidade máxima de fotossíntese	$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
A_n	Assimilação líquida	$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
a_w	Parâmetro dependente da temperatura	
$A(i)$	Fração com capacidade de infiltração menor que i	
B	Parâmetro de superfície	
b	Inclinação da curva de retenção	
b_w	Parâmetro dependente da temperatura	
C_{dh}	Coefficiente de transferência turbulenta de calor	
C_{DN}	Coefficiente de arrasto para condições neutras	
C_{dq}	Coefficiente de transferência turbulenta de umidade	
C_G	Coefficiente térmico do solo	$\text{K m}^2 \text{J}^{-1}$
C_{Gsat}	Coefficiente térmico do solo saturado	$\text{K m}^2 \text{J}^{-1}$
C_h	Ajuste para calor em condições instáveis	
C_h^*	Coefficiente da razão da rugosidade para calor	
CH_4	Gás Metano	
C_i	Concentração interna de CO_2	$\mu\text{mol mol}^{-1}$
C_m	Ajuste para momento em condições instáveis	
C_m^*	Coefficiente da razão da rugosidade para momento	
CO_2	Gás Carbônico	
c_p	Calor específico do ar a pressão constante	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

C_s	Concentração externa de CO_2	$\mu\text{mol mol}^{-1}$
C_T	Coefficiente térmico na interface solo-vegetação	$\text{K m}^2 \text{J}^{-1}$
C_V	Coefficiente térmico da vegetação	$\text{K m}^2 \text{J}^{-1}$
C_1	Coefficiente das propriedades hidráulicas do solo	m^2
C_{1sat}	Parâmetro dependente do tipo de solo	
C_2	Velocidade que perfil de umidade é repostado	m^2
C_{2ref}	Parâmetro dependente do tipo de solo	
C_3	Termo para drenagem gravitacional	
C_4	Parâmetro de equilíbrio na interface	
C_{4ref}	Parâmetro da disposição das camadas de solo	
C'_{4ref}	Coefficiente de referência de grade	
D_{max}	Máximo déficit de saturação folha para o ar	g kg^{-1}
d_r	Altura da vegetação	m
D_s	Déficit de saturação folha para o ar	g kg^{-1}
D_1	Difusão vertical entre as camadas d_1 e d_2	s^{-1}
D_2	Difusão vertical entre as camadas d_2 e d_3	s^{-1}
d_2	Profundidade da zona de raízes	m
d_3	Altura da zona de sub-raízes	m
e_a	Pressão parcial de vapor	Pa
E_g	Evaporação do solo	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
E_r	Evaporação direta na superfície das folhas	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
e_{sat}	Pressão de saturação do vapor d'água	Pa
e_t	Erro no período t	
E_{tr}	Transpiração da fração seca das folhas	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
E_v	Evapotranspiração da vegetação	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
f	Fator de conexão	
F_h	Curva de estabilidade para calor	
F_m	Curva de estabilidade para momento	
F_W	Fluxo de água no solo	mm s^{-1}
f_0	Fator de conexão para $D_s = 0$	
F_1	Parâmetro da influência da fotossíntese	
F_2	Parâmetro da pressão hidráulica	

F_3	Parâmetro da pressão de vapor na atmosfera	
F_4	Parâmetro da temperatura do ar	
g_c	Condutância cuticular	mm s^{-1}
g_m^*	Condutância do mesófilo	mm s^{-1}
g_s	Condutância do estômato	mm s^{-1}
H	Fluxo de calor sensível	W m^{-2}
h_e	Altura efetiva do solo	mm
h_u	Umidade relativa do ar na superfície do solo	
h_v	Coefficiente de Halstead	
I	Variação da capacidade de infiltração	
i	Capacidade de infiltração	
I_a	Radiação ativa de fotossíntese	W m^{-2}
i_m	Capacidade de infiltração máxima	
K	Condutividade hidráulica	mm s^{-1}
K_2	Drenagem gravitacional para a camada d_3	s^{-1}
K_3	Drenagem gravitacional pela base de d_3	s^{-1}
L	Calor latente de evaporação da água	J kg^{-1}
LE	Fluxo de calor latente	W m^{-2}
L_0	Comprimento de Obukhov	m
M_t	Valor medido no período t	
n	Quantidade de períodos t	
P	Precipitação	mm
p_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
p_{eq}	Parâmetro adimensional	
P_g	Precipitação que atinge o solo	mm s^{-1}
p_h	Potência da razão de rugosidade para calor	
p_m	Potência da razão de rugosidade para momento	
p_q	Coefficiente de restauração do fluxo	
P_r	Precipitação que é interceptada pela vegetação	mm s^{-1}
P_{ref}	Precipitação de referência	mm
P_t	Valor calculado pelo modelo no período t	
Q_r	<i>Runoff</i>	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

q_{va}	Umidade específica do ar	kg kg^{-1}
q_{vsat}	Umidade específica de saturação	kg kg^{-1}
R	Razão entre os coeficientes de arrasto	
R_a	Resistência aerodinâmica	s m^{-1}
R_d	Respiração celular	$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
R_G	Radiação de ondas curtas que chega ao solo	W m^{-2}
R_{GL}	Limite de radiação de ondas curtas incidentes	W m^{-2}
Ri_b	Número de Richardson para escoamentos médios	
R_n	Radiação líquida	W m^2
R_r	Escoamento superficial na vegetação	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
R_s	Resistência superficial para evapotranspiração	
R_{smin}	Resistência superficial mínima	
R_{si}	Radiação solar incidente	W m^{-2}
R_{sr}	Radiação solar refletida	W m^{-2}
T_a	Temperatura atmosférica	K
T_s	Temperatura na interface superfície-atmosfera	K
T_{sf}	Temperatura na folha	K
t_0	Tempo inicial	s
T_2	Temperatura média da zona de raízes	K
V_a	Velocidade do vento	m s^{-1}
veg	Fração da vegetação	
X_{are}	Conteúdo de areia	%
X_{arg}	Conteúdo de argila	%
z_d	Profundidade	m
w_{fc}	Umidade da capacidade de campo	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
w_g	Umidade na camada superficial do solo	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
w_{geq}	Umidade equilíbrio das forças gravitacionais/capilares	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
w_l	Parâmetro de pequeno valor 10^{-3}	
w_r	Umidade nas plantas	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
w_{rmax}	Umidade máxima nas plantas	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
w_{sat}	Umidade de saturação do solo	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
W_{UE}	Eficiência de uso da água	g g^{-1}

W_{UEn}	Valor mínimo da eficiência do uso da água	g g^{-1}
w_{wilt}	Umidade do ponto de murchamento	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
w_2	Umidade média da zona de raízes	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
$w_{2,3}$	Umidade média na interface da zona de raízes	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
w_3	Umidade do solo para a terceira camada	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
y_a	Umidade relativa do ar medida	
z	Altura de medição das variáveis meteorológicas	m
z_0	Altura de rugosidade	m
z_{0H}	Comprimento de rugosidade para calor	m
$z_{0\tau}$	Comprimento de rugosidade para momento	m
α_s	albedo da superfície	
β	Razão de secamento da água interceptada pela vegetação	
Γ	Ponto de compensação	$\mu\text{mol mol}^{-1}$
γ	Constante ajustável das condições instáveis	
κ	Constante de Von Karman	
δ	Fração de vegetação úmida	
Δ_t	Tempo ocorrência de <i>runoff</i> na vegetação	s
ε	Eficiência da conversão da luz	mg J^{-1}
ε_a	Emissividade do ar	
ε_g	Emissividade do solo	
ε_0	Quantidade máxima de eficiência	mg J^{-1}
ζ	Variável de estabilidade	
ρ	Densidade do ar	kg m^{-3}
ρ_w	Massa específica da água	kg m^{-3}
σ	Constante de Stefan-Boltzman	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
τ_d	Período do ciclo diurno do solo	s
ψ_m	Função de estabilidade para momento	
ψ_h	Função de estabilidade para calor	

Lista de Abreviaturas e Siglas

Abreviatura	Significado
A-gs	Modelo fisiológico para condutância estomática
ARPS	<i>Advanced Regional Prediction System</i>
BATS	<i>Biosphere Atmosphere Transfer Scheme</i>
CAM	<i>Canopy-Atmosphere Model</i>
CBL	<i>Convective Boundary Layer</i>
CLP	Camada Limite Planetária
CMAYO	Estação experimental de Campo de Mayo - Argentina
DMA	Desvio médio absoluto
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EM	Erro médio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EQM	Erro quadrático médio
GCM	<i>General Circulation Model</i>
gs	Modelo simplificado para condutância estomática
IAF	Índice de Área Foliar
IBIS	<i>Integrated Biosphere Simulator</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISBA	<i>Interaction Soil Biosphere Atmosphere</i>
ISBA-A-gs	Modelo ISBA com módulo A-gs para cálculo da transpiração na vegetação
ISBA-gs	Modelo ISBA com módulo gs para o cálculo do fluxo de CO ₂
LAI	Índice de área foliar
LEMMA	Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental
MCG	Modelo de Circulação Geral

MCT	Método de Covariâncias Turbulentas
MCTA	Método de Covariâncias Turbulentas Atenuadas
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
PBL	<i>Planetary Boundary Layer</i>
REQM	Raiz quadrada do erro quadrático médio
SCAM	<i>Simplified Canopy-Atmosphere Model</i>
SiB	<i>Simple Biosphere Model</i>
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SLOU	Estação experimental de São Lourenço no oeste do Paraná - Brasil
SLOU2001	SLOU, série de dados referente à safra do ano de 2001
SLOU2002	SLOU, série de dados referente à safra do ano de 2002
SVAT	<i>Soil Vegetation Atmosphere Transfer</i>
UNFCCC	<i>United Nation Framework Convention on Climate Change</i>
VIC	<i>Variable Infiltration Capacity</i>
VPD	<i>Vapour Pressure Deficit</i>

Lista de Figuras

3.1	Esquema do modelo ISBA com três camadas de solo.	42
3.2	Variáveis do modelo ISBA com três camadas de solo.	43
4.1	Temperatura do ar medida em SLOU (T_{ar}), dezembro de 2001.	73
4.2	Temperatura do ar medida em SLOU (T_{ar}), dezembro de 2002.	73
4.3	Radiação solar incidente medida em SLOU (R_{si}), dezembro de 2001.	74
4.4	Radiação solar incidente medida em SLOU (R_{si}), dezembro de 2002.	74
4.5	Radiação solar refletida medida em SLOU (R_{sr}), dezembro de 2001.	74
4.6	Radiação solar refletida medida em SLOU (R_{sr}), dezembro de 2002.	75
4.7	Velocidade do vento medida em SLOU (V), dezembro de 2001.	75
4.8	Velocidade do vento medida em SLOU (V), dezembro de 2002.	75
4.9	Umidade relativa medida em SLOU (UR), dezembro de 2001.	76
4.10	Umidade relativa medida em SLOU (UR), dezembro de 2002.	76
4.11	Precipitação medida em SLOU (P), dezembro de 2001.	76
4.12	Precipitação medida em SLOU (P), dezembro de 2002.	77
4.13	Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2001.	81
4.14	Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2002.	81
4.15	Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2001.	82
4.16	Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2002.	82
4.17	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2001.	82

4.18	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2002.	83
4.19	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2001.	83
4.20	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2002.	83
4.21	Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2001.	84
4.22	Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2002.	84
4.23	Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.	85
4.24	Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.	85
4.25	Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2001.	86
4.26	Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2002.	86
4.27	Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.	86
4.28	Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.	87
4.29	Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.	87

4.30	Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.	87
4.31	Umidade estimada na vegetação (w_r) pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.	88
4.32	Umidade retida na vegetação (w_r) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.	88
4.33	Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r), estimados pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.	88
4.34	Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r), estimados pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.	89
4.35	Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.	89
4.36	Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.	89
4.37	Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.	90
4.38	Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.	90
4.39	Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2001.	92
4.40	Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2002.	92
4.41	Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2001.	93
4.42	Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2002.	93
4.43	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2001.	93
4.44	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2002.	94

4.45	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2001.	94
4.46	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2002.	94
4.47	Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-A-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2001.	95
4.48	Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-A-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2002.	95
4.49	Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-A-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.	96
4.50	Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-A-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.	96
4.51	Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-A-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2001.	97
4.52	Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-A-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2002.	97
4.53	Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.	97
4.54	Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.	98
4.55	Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.	98
4.56	Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.	98

4.57	Umidade retida na vegetação (w_r) calculada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.	99
4.58	Umidade retida na vegetação (w_r) calculada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.	99
4.59	Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r), estimados pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.	99
4.60	Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r) estimados pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.	100
4.61	Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.	100
4.62	Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.	100
4.63	Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.	101
4.64	Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.	101
4.65	Temperatura do ar medida em CMAYO (T_{ar}) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.	106
4.66	Radiação solar incidente medida em CMAYO (R_{si}) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.	106
4.67	Radiação solar refletida medida em CMAYO (R_{sr}) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.	107
4.68	Velocidade do vento medida em CMAYO (V) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.	107
4.69	Umidade relativa medida em CMAYO (UR) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.	107
4.70	Precipitação medida em CMAYO (P) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.	108
4.71	IAF estimado em CMAYO (LAI) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.	108

4.72	Temperatura calculada pelo ISBA-gs na interface superfície-atmosfera (T_s) e temperatura medida próximo a superfície (T_{sup}), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	109
4.73	Temperatura média calculada pelo ISBA-gs na camada de raízes (T_2) e temperatura medida no solo (T_{solo}), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	110
4.74	Umidades calculadas pelo ISBA-gs na camada superficial de solo (w_g), camada de raízes (w_2) e camada abaixo da zona de raízes (w_3), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	110
4.75	Umidade calculada pelo ISBA-gs na vegetação (w_r), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	110
4.76	Fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e calor absorvido pelo solo (G), calculados pelo ISBA-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	111
4.77	Radiação líquida (R_n) calculada pelo ISBA-gs e medida em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	111
4.78	Fluxos de calor latente da evaporação do solo (LE_g), calor latente na transpiração (LE_{tr}) e calor latente da evaporação direta da vegetação (LE_r) calculados pelo ISBA-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	112
4.79	Condutância estomática de vapor d'água (g_s) calculada pelo ISBA-gs em Campo de Mayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	112
4.80	Fluxos de carbono calculado pelo ISBA-gs (A_n) e medido (fC) em Campo de Mayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	113
4.81	Temperatura calculada pelo ISBA-A-gs na interface superfície-atmosfera (T_s) e temperatura medida próximo a superfície (T_{sup}) em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	114
4.82	Temperatura média calculada pelo ISBA-A-gs na camada de raízes (T_2) e temperatura medida no solo (T_{solo}) em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	114

4.83	Umidades calculadas pelo ISBA-A-gs na camada superficial de solo (W_g), na camada de raízes (W_2) e na camada abaixo da zona de raízes (W_3) em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	115
4.84	Umidade retida na vegetação (w_r) calculada pelo ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	115
4.85	Fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e calor absorvido pelo solo (G), calculados pelo ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	116
4.86	Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs e radiação líquida medida em Campo de Mayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	116
4.87	Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r) calculados com o ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	117
4.88	Condutância estomática de vapor d'água (g_s) calculada pelo ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	117
4.89	Fluxos de carbono calculado pelo ISBA-A-gs (A_n) e medido (fC) em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.	117
4.90	Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-gs através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.	120
4.91	Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-gs através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.	120
4.92	Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-Ags através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.	121
4.93	Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-Ags através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.	121

4.94	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.	122
4.95	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.	122
4.96	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.	123
4.97	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.	123
4.98	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU. . . .	124
4.99	Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU. . . .	124
4.100	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU. . . .	125
4.101	Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU. . . .	125
4.102	R_d estimada pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens para o cálculo original de Calvet et al. (1998) (CV98) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em SLOU.	126
4.103	R_d estimada pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens para o cálculo original de Calvet et al. (1998) (CV98) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em SLOU.	127

4.104	Assimilação líquida de CO_2 (A_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens para o cálculo da R_d original de Calvet et al. (1998) (CV98) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em comparação com valores medidos em CMAYO.	128
4.105	respiração (R_d) estimada no modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Jacobs (1994) (JC94) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em comparação com valores medidos em CMAYO.	128

Lista de Tabelas

3.1	Coeficientes dos ajustes das curvas polinomiais realizado por Vissotto (2003), para duas séries de dados de SLOU.	47
3.2	Propriedades do solo estudado.	53
3.3	Coeficientes da regressão para obtenção de C_{4ref} a partir da equação (3.67).	53
3.4	Valores típicos dos parâmetros utilizados no modelo A-gs para plantas C3.	59
4.1	Coeficientes do ISBA (Noilhan e Planton, 1989) para os tipos de solo de Clapp e Hornberger (1978) e os dados de ensaios laboratoriais do solo de SLOU (Prevedello, 2003; Vissotto, 2003).	72
4.2	Resumo dos forçantes medidos no experimento de campo em SLOU entre os dias, 1 de outubro de 2001 e 22 de fevereiro de 2002.	72
4.3	Resumo dos forçantes medidos no experimento de campo em SLOU entre os dias, 1 de outubro de 2002 e 31 de dezembro de 2002.	73
4.4	Resumo dos fluxos de calor e radiação líquida, medidos em SLOU nos experimentos de campo em dezembro de 2001 e 2002.	77
4.5	Cenários testados para as alturas das camadas de solo nos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs em SLOU.	78
4.6	Análises do partionamento do fluxo de calor latente em provenientes de evaporação no solo (LE_g), transpiração (LE_{tr}) e evaporação direta na vegetação (LE_r). Condutância estomática de vapor de água (g_s) e a assimilação líquida de CO_2 (A_n). Valores calculados em SLOU com o modelo ISBA-gs em dezembro de 2001 e 2002.	91

4.7	Análises do particionamento do fluxo de calor latente, em provenientes de, evaporação no solo (LE_g), transpiração (LE_{tr}) e evaporação direta na vegetação (LE_r). Condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 (A_n). Valores calculados em SLOU com o modelo ISBA-A-gs em dezembro de 2001 e 2002.	102
4.8	Análise dos dados forçantes medidos no experimento de campo em CMAYO, entre os dias 23 de dezembro de 2008 e 3 de janeiro de 2009.	108
4.9	Análises da radiação líquida (R_n) e da assimilação líquida de CO_2 , medidos no experimento de campo em CMAYO entre os dias 23 e 31 de dezembro de 2008.	109
4.10	Análises da condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 (A_n), calculada pelo ISBA-gss em CMAYO entre os dias 23 e 31 de dezembro de 2008.	113
4.11	Análises da condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 (A_n), calculadas em CMAYO entre os dias 23 e 31 de dezembro de 2008.	118
A.1	Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g _s em SLOU.	134
A.2	Análise estatística do fluxo de calor no solo (G) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g _s em SLOU.	135
A.3	Análise estatística do fluxo de calor sensível (H) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g _s em SLOU.	136
A.4	Análise estatística do fluxo de calor latente (LE) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g _s em SLOU.	137
A.5	Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.	138

A.6	Análise estatística do fluxo de calor no solo (G) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.	139
A.7	Análise estatística do fluxo de calor sensível (H) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.	140
A.8	Análise estatística do fluxo de calor latente (LE) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.	141
B.1	Cenários propostos para as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs na Argentina.	143
B.2	Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g _s na Argentina.	143
B.3	Análise estatística do fluxo de CO ₂ (A_n) prognóstico e medido, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g _s na Argentina.	144
B.4	Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs na Argentina.	145
B.5	Análise estatística do fluxo de CO ₂ (A_n) prognóstico e medido, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs na Argentina.	146

Capítulo 1

Introdução

Um dos assuntos científicos mais importantes da atualidade é o da intensificação do efeito estufa e sua possível correlação com mudanças climáticas. Há um particular interesse no papel das atividades humanas em tais mudanças por conta das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Dentre estas atividades, a modificação do uso do solo é uma das principais, possivelmente a segunda mais importante, logo atrás a emissão de gases decorrente de combustão para fins de obtenção de energia. Dentre as atividades humanas que provocam mudança no uso do solo, a que nos interessa aqui é a modificação da cobertura vegetal, seja por desmatamento, seja por atividades agropecuárias, ou até mesmo por inundações decorrentes da construção de lagos artificiais para diferentes fins. Um problema típico seria o de se avaliar os diferentes potenciais de emissão/sequestro de dióxido de carbono (CO_2) para diferentes usos de solo em uma mesma área decorrentes de reflorestamento/desmatamento, mudança de cultura agrícola, alagamento, etc.

Um grande esforço tem sido feito pela comunidade científica para se quantificar os fluxos de GEE entre a superfície (tanto em terra quanto em água) e a atmosfera. As duas principais frentes de pesquisa são nas técnicas de medição e na modelagem matemática, sendo que a modelagem necessita das medições para sua calibração e validação. A grande utilidade da modelagem é o baixo custo para obtenção de resultados, a facilidade de espacialização dos fluxos, a possibilidade de realização de prognósticos e a criação de possíveis cenários futuros.

Além de ferramenta prognóstica para estimar fluxos de GEE, estes modelos matemáticos podem ser usados em conjunto com modelos mais gerais de transferência

entre solo/vegetação e atmosfera (chamados de SVAT's) e se acoplando a modelos ecológicos, meteorológicos, climáticos e hidrológicos.

Neste trabalho, será estudada a modelagem do fluxo (emissão e sequestro) de CO_2 em plantações de soja. O modelo será construído em torno de um SVAT existente conhecido por ISBA (Noilhan e Planton, 1989) com algumas modificações e a inclusão de módulos específicos para cálculo dos fluxos de CO_2 .

As modificações nos aspectos físicos do modelo SVAT original implementadas no presente trabalho foram originalmente propostas por Manzi e Planton (1994), Mahfouf e Noilhan (1996), Habets et al. (1999a), Mascart et al. (1995), Boone et al. (1999). Dias et al. (2002), Prevedello (2003), Cancelli (2003) e Vissotto (2003). Nos aspectos biológicos, a principal modificação foi a substituição da abordagem de Jarvis (1976) (denominada aqui por gs) para o cálculo da abertura dos estômatos pela abordagem mais fisiológica de Jacobs (1994) (denominada A-gs). O modelo na sua forma mais completa será chamado aqui de ISBA-A-gs. No presente trabalho a abordagem de Jarvis (1976) também foi implementada para fins de comparação dos fluxos entre as duas abordagens. Tal modelo mais simples será denominado ISBA-gs. Uma modificação inédita para o ISBA na abordagem da respiração noturna também é proposta.

Finalmente são apresentadas algumas campanhas de medição micrometeorológicas sobre plantações de soja, incluindo uma que mediu o fluxo de CO_2 . Tais medições são usadas para calibrar/validar a modelagem.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- implementação em linguagem FORTRAN do ISBA com uma série de modificações e com tanto o módulo gs quanto o módulo A-gs;
- aplicação do ISBA a uma plantação de soja no estado do Paraná, e uso de dados micrometeorológicos observados para fins de comparação e calibração do modelo;
- verificação do modelo através da aplicação em uma plantação de soja na Argentina e comparação com dados observados de fluxos de CO_2 ;
- comparação entre a modelagem gs e A-gs.

No capítulo (2) é apresentada a revisão bibliográfica relativa ao tema.

No capítulo (3) são apresentados os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs.

No capítulo (4), aplica-se os modelos ao estado do Paraná usando duas séries de observações micrometeorológicas para fins de calibração. O modelo é então aplicado a uma plantação de soja na Argentina onde fluxos de CO₂ foram medidos. Há também algumas comparações entre versões com modificações propostas para os modelos.

Por fim, no capítulo (5) serão apresentadas as conclusões e as recomendações.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Esquemas de transferência entre solo-vegetação e atmosfera (SVAT's) incluem em parametrizações em diferentes graus de complexidade do particionamento de energia e da condutância estomática das plantas. Em uma abordagem mais meteorológica Niyogi e Raman (1997) comparou diferentes parametrizações de resistência estomática de SVAT's frequentemente encontrados de forma acoplada em modelos atmosféricos. Dentre os trabalhos estudados podemos citar Deardorff (1978), Dickinson et al. (1986), Avissar et al. (1985), Sellers et al. (1986), Wetzzel e Chang (1988), Noilhan e Planton (1989), Ács (1994), Bosilovich e Sun (1995), Viterbo e Beljaars (1995), Pleim e Xiu (1995) e Alapaty et al. (1997).

Dentre os citados, destacamos o modelo SVAT ISBA (Noilhan e Planton, 1989; Noilhan e Mahfouf, 1996), empregado nesta dissertação, que é utilizado de forma acoplada a modelos hidrológicos e atmosféricos. No modelo SVAT ISBA original, como em muitos outros, a descrição biológica do controle da transpiração é feita através de uma simples parametrização empírica para a condutância estomática, adaptando a abordagem proposta em Jarvis (1976). A análise das interações, da folha para a copa da vegetação, é feita pela multiplicação da condutância estomática de vapor de água pelo índice de área foliar (IAF). O valor do IAF é obtido através de informações auxiliares, tais como dados de satélite. O esquema ISBA, uma vez calibrado, é capaz de descrever o efeito da atmosfera e radiação sobre a condutância estomática.

Para parametrizar a resposta estomática em modelos meteorológicos, foi desenvolvida por Jarvis (1976) uma abordagem para representar a resistência estomática,

que vem sendo utilizada em diversos modelos SVAT's como os propostos por Noilhan e Planton (1989); Pleim e Xiu (1995); Viterbo e Beljaars (1995); Bosilovich e Sun (1995); Alapaty et al. (1997). Nestes modelos a resposta estomática é calculada em função de parâmetros meteorológicos, tais como temperatura do ar, pressão de vapor ambiente, radiação e disponibilidade de umidade no solo.

Além destes esquemas com abordagem mais meteorológica, existem também modelos com abordagem mais fisiológica (Farquhar e Sharkey, 1982) para as interações da biosfera-atmosfera terrestre. Entre estes pode-se citar alguns que já são usados de forma acoplada a modelos atmosféricos (Niyogi e Raman, 1997): Farquhar et al. (1980), Ball et al. (1987), Meyers e U Paw (1987), Lynn e Carlson (1990), Raupach (1991), Collatz et al. (1991, 1992), Kim e Verma (1991), Baldocchi (1992, 1994), Jacobs (1994), Dougherty et al. (1994), Sellers et al. (1996), Cox et al. (1998) e Foley et al. (1996). Niyogi e Raman (1997) observam também que alguns modelos com sofisticada abordagem fisiológica como Monteith (1995b,a) e Makela et al. (1996) ainda não foram acoplados a modelos atmosféricos ou hidrológicos.

Uma das principais diferenças entre as abordagens, meteorológica e fisiológica nos modelos SVAT's, é a maneira pela qual a condutância estomática é modelada. A resposta dos estômatos, quantificada como resistência (ou condutância) estomática, é uma medida da dificuldade (ou facilidade) para a transpiração da vegetação. A mudança na transpiração altera a evapotranspiração/fluxo de calor latente, a qual, em resposta ao balanço de energia na superfície, interfere na estimativa do fluxo de calor sensível (Niyogi e Raman, 1997; Alapaty et al., 1997; Jarvis e McNaughton, 1986; De Bruin, 1983).

Mais recentemente, a tendência tem sido a de se substituir as abordagens puramente meteorológicas por abordagens fisiológicas, que permitem modelar a resposta das plantas às trocas gasosas tais como assimilação líquida de carbono e respiração noturna. Dentre os modelos que utilizam abordagens fisiológicas para descrever a condutância estomática, pode-se citar Jacobs (1994); Sellers et al. (1996); Foley et al. (1996); Cox et al. (1998); Calvet et al. (1998).

Recentes análises de modelos SVAT's sugerem que as abordagens meteorológicas e fisiológicas para o cálculo da condutância estomática, podem fornecer resultados diferentes com relação a alterações nos níveis de CO₂ atmosférico. Tendo em vista

o cenário atual de aquecimento global devido ao aumento de gases de efeito estufa na atmosfera, é fundamental que os modelos SVAT's levem em conta o CO₂ atmosférico. Monteith (1995b) sugere que sejam utilizadas abordagens fisiológicas dentro de modelos meteorológicos.

Niyogi e Raman (1997) apontam também para o fato de que devido à abundância em nível mundial de vegetação do tipo C_3 grande quantidade de pesquisas têm sido realizadas para esse tipo de vegetação, e ressalta a importância de novas pesquisas com vegetação do tipo C_4 (Collatz et al., 1992; Knapp, 1993; Henderson et al., 1994).

Segundo Calvet et al. (1998), em geral a parametrização do tipo Jarvis (Jarvis, 1976) fornece boas estimativas da transpiração. No entanto, a resposta estomática com relação a umidade do ar é simulada com dificuldade, e muitas vezes requer uma análise aprofundada dos fluxos e da condutância estomática em campo para calibrar o modelo. De fato, presume-se que os vários fatores ambientais agem de forma independente na condutância estomática, enquanto que experimentos de campo sugerem que podem ocorrer fortes interações entre eles (Collatz et al., 1991; Jacobs, 1994). Além disso, o valor prescrito do índice de área foliar (IAF) é muitas vezes uma estimativa grosseira, que não leva em conta as rápidas mudanças na cobertura vegetal associadas a eventos climáticos (secas em particular). Outra limitação da parametrização do tipo Jarvis (Jarvis, 1976) é a falta de realimentação com relação à concentração de CO₂ atmosférico. De fato, segundo Calvet et al. (1998) um aumento na concentração de CO₂ induz uma resposta fisiológica das plantas por meio de uma redução na condutância estomática para vapor de água. Este efeito pode influenciar os balanços de energia e água em diversas escalas de tempo. Por isso as parametrizações fisiológicas de CO₂ parecem ser mais apropriadas do que as parametrizações do tipo Jarvis. Isto é particularmente verdadeiro para simulações de mudanças climáticas (Betts et al., 1997) onde a retroalimentação da vegetação-clima-CO₂, precisa ser incluída.

2.1 Breve histórico do modelo ISBA

Noilhan e Planton (1989) notaram que pesquisas na área de modelagem atmosférica estavam sendo realizadas com atenção especial aos processos de acoplamento, entre

superfície do solo e atmosfera, e perceberam que os estudos demonstravam a necessidade de se aprimorar a representação dos processos na superfície terrestre. O modelo ISBA original, proposto por Noilhan e Planton (1989), é limitado a simulações de curto prazo e desconsidera regiões onde há ocorrência de neve e gelo. Noilhan e Planton (1989) procuraram utilizar um determinado número de parâmetros para descrever os processos físicos, conservando os principais mecanismos que controlam os balanços de água e energia na superfície, utilizando dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação, radiação solar incidente e refletida, particionando as variáveis com balanços de energia e umidade na interface superfície-atmosfera, e integrando as equações diferenciais ordinárias no tempo para prever as temperaturas e umidades desejadas.

O modelo ISBA original de Noilhan e Planton (1989) vem sendo aperfeiçoado ao longo do tempo. Dentre as melhorias destacam-se, para o presente trabalho: a formulação para umidade retida na vegetação (Manzi e Planton, 1994); formulação para drenagem gravitacional (Mahfouf e Noilhan, 1996); formulação para escoamento superficial (Habets et al., 1999a); formulação dos coeficientes de transporte de escalares (Mascart et al., 1995) e a formulação da inclusão de uma camada de solo para a zona de sub-raízes (Boone et al., 1999). A inclusão do módulo A-gs de Jacobs (1994) foi introduzido ao modelo ISBA pela primeira vez por Calvet et al. (1998) visando a melhoria no cálculo da transpiração na vegetação e possibilitando o cálculo de seu fluxo de CO₂. Estas modificações são brevemente comentadas a seguir.

Manzi e Planton (1994) implementaram um esquema de parametrização para as interações do modelo ISBA, onde descrevem adaptações recentes para aplicação em florestas tropicais. O trabalho incluiu ao modelo ISBA uma compartimentação no balanço de energia na superfície, notando então que o modelo ISBA passou a concordar razoavelmente bem com as observações para diferentes sistemas de cobertura do solo. Em comparação com experiências anteriores, o trabalho concluiu que as novas parametrizações melhoraram as simulações sobre a região amazônica.

Mahfouf e Noilhan (1996) incluíram no modelo ISBA uma formulação para contabilização dos efeitos referentes à drenagem gravitacional.

Habets et al. (1999a) implementaram e interação do esquema ISBA com um mo-

delo hidrológico. A introdução do ciclo diurno no modelo hidrológico permite um acoplamento com a atmosfera através dos cálculos dos balanços energético e hídrico. A versão original do ISBA foi modificada para contabilizar o escoamento superficial de sub-grade. Habets et al. (1999a) utilizaram classificações de solo e vegetação existentes em alta resolução espacial em conjunto com informações de satélite para monitorar a evolução mensal da vegetação. Percebendo que as diferenças anuais de precipitação e evapotranspiração potencial têm grande impacto sobre o regime de vazões em rios, também realizaram um estudo unidimensional onde apresentam a sensibilidade do modelo ao particionamento da precipitação em evaporação, escoamento para a sub-grade de escoamento superficial (*runoff*), drenagem gravitacional e umidade retida na cobertura vegetal.

Mascart et al. (1995) modificaram a formulação fluxo-perfil para a camada superficial apresentada em Louis (1979), usada em muitos modelos atmosféricos. Foram realizadas modificações de uma forma simples, para permitir diferentes valores dos comprimentos de rugosidade para calor e quantidade de movimento.

Boone et al. (1999) incluíram uma terceira camada de solo no modelo ISBA. O conteúdo de água no solo entre a base da zona de raiz e da camada de solo profunda é descrito usando uma formulação generalizada do método de força-restauração. O novo coeficiente de força-restauração é calibrado usando um modelo detalhado de alta resolução para a transferência de água no solo, sendo então relacionado com as propriedades de textura do solo, utilizando relações de regressão simples. Mostrou-se que a utilização de um coeficiente calibrado dá melhores resultados, em geral, que um método de solução direta, para uma geometria de modelo semelhante, com um mesmo número de camadas. Na versão de duas camadas inicial do ISBA, não era possível distinguir os reservatórios de água no solo, na zona de raízes e sub-raízes. Com a versão de três camadas, a camada de solo profunda pode fornecer água ao sistema somente através de ascensão capilar, e o teor de água disponível no solo para a transpiração fica claramente definido. Boone et al. (1999) examinaram três casos-testes em que dados atmosféricos forçantes, dados de propriedades do solo e cobertura vegetal, e dados do perfil de umidade do solo, estavam disponíveis em um período anual. O estudo concluiu que usando a versão de três camadas do ISBA há uma melhora geral nos resultados da modelagem, e os valores para os parâmetros-

chave que relacionam evapotranspiração e a umidade do solo são mais consistentes com os inferidos a partir de observações.

Calvet et al. (1998) acoplaram ao modelo ISBA descrito até aqui um módulo para descrever de forma mais realista a condutância estomática considerando a relação funcional entre a abertura estomática e a fotossíntese (Wong et al., 1979), com a intenção de simular adequadamente os processos de superfície em relação à concentração de CO₂ no ambiente, à temperatura do ar e à umidade do ar. Este módulo, denominado A-gs, e seu acoplamento ao modelo ISBA, produzindo o modelo ISBA-A-gs é objeto da presente dissertação. A assimilação líquida de CO₂ estimada pelo modelo ISBA-A-gs vem sendo utilizada em pesquisas recentes para simular o crescimento e mortalidade das plantas, diagnosticando o índice de área foliar (*IAF*) de forma consistente com o clima e concentração de CO₂ atmosférico (Calvet et al., 1998; Gibelin et al., 2006, 2008; Brut et al., 2009).

No estado do Paraná Prevedello (2002) realizou uma adequação dos parâmetros de física dos solos do modelo ISBA para ambientes tropicais e em Prevedello (2003) realizou experimentos de campo que foram utilizados posteriormente por Vissotto (2003) que incluiu no modelo ISBA modificações para os fluxos de massa no solo alternativas ao ISBA original.

Cancelli (2003) adaptou a base cartográfica da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para as estações telemétricas do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) determinando as propriedades físico-hídricas para o solo, e propiciando que o modelo ISBA fosse utilizado em vários locais no estado do Paraná.

Capítulo 3

Modelo Matemático de Interação Superfície-Atmosfera

Neste capítulo, o modelo matemático implementado nesta dissertação é apresentado detalhadamente. A primeira seção apresentará o sistema de equações ISBA a ser resolvido e inclui a definição e o detalhamento de todos os termos e coeficientes envolvidos. As formulações complementares para condutância estomática e fluxos de carbono são apresentadas separadamente em seções posteriores.

3.1 Sistema de equações ISBA

O sistema de equações que forma o ISBA foi originalmente proposto por Noilhan e Planton (1989), porém muitas modificações têm sido propostas desde sua versão original. Além da implementação dos modelos fisiológicos das plantas, apresentados mais tarde, as modificações ao ISBA original implementadas nesta dissertação são:

- adaptação de parâmetros para clima tropical chuvoso (Manzi e Planton, 1994);
- adição de drenagem gravitacional (Mahfouf e Noilhan, 1996);
- aprimoramento dos coeficientes de transporte vertical Louis (1979); Mascart et al. (1995);
- implementação do esquema VIC (*Variable Infiltration Capacity*) para inclusão de escoamento superficial (Habets e Saulnier, 2001; Habets et al., 1999b; Wood et al., 1992);

- inclusão de um terceiro compartimento de solo na zona sub-raízes (Boone et al., 1999);

As equações prognósticas que compõem o modelo ISBA são as seguintes:

$$\frac{dT_s}{dt} = C_T(R_n - H - LE) - \frac{2\pi}{\tau_d}(T_s - T_2), \quad (3.1)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{\tau_d}(T_s - T_2), \quad (3.2)$$

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{C_1}{\rho_w d_1}(P_g - E_g) - \frac{C_2}{\tau_d}(w_g - w_{geq}), \quad (3.3)$$

$$\frac{dw_2}{dt} = \frac{1}{\rho_w d_2}(P_g - E_g - E_{tr}) - D_2 - K_2, \quad (3.4)$$

$$\frac{dw_3}{dt} = \frac{d_2}{d_3 - d_2}(K_2 - D_2) - K_3, \quad (3.5)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{\rho_w d_r}(P_r - E_r - R_r). \quad (3.6)$$

Nas equações (3.1)–(3.6) identifica-se: temperatura na interface superfície-atmosfera (T_s), capacidade térmica da superfície (C_T), radiação líquida (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), período do ciclo diurno do solo (τ_d), temperatura média da zona de raízes (T_2), umidade volumétrica na camada superficial do solo de profundidade d_1 (w_g), massa específica da água (ρ_w), coeficiente função das propriedades hidráulicas do solo próximas a superfície (C_1), coeficiente que caracteriza velocidade com que o perfil de umidade é repostado ao equilíbrio (C_2), precipitação que atinge o solo (P_g), evaporação do solo (E_g), umidade de equilíbrio das forças gravitacionais e capilares (w_{geq}), umidade média da zona de raízes (w_2), profundidade da zona de raízes (d_2), transpiração da fração seca das folhas (E_{tr}), umidade nas plantas (w_r), altura da vegetação (d_r), precipitação interceptada pela vegetação (P_r), evaporação da umidade na superfície das folhas ($E_r = E_v - E_{tr}$), evapotranspiração da vegetação (E_v), *runoff* da vegetação, ou seja, escoamento das folhas para o solo (R_r).

Este modelo possui um nível de solo a mais que o ISBA original de (Noilhan e Planton, 1989). A nova equação (3.5) governa a variação da umidade nesta nova camada. d_3 é a profundidade em que a umidade do solo não sofre mais alterações devido à oscilação diurna e sua variação no tempo pode ser desconsiderada, D_2 é a

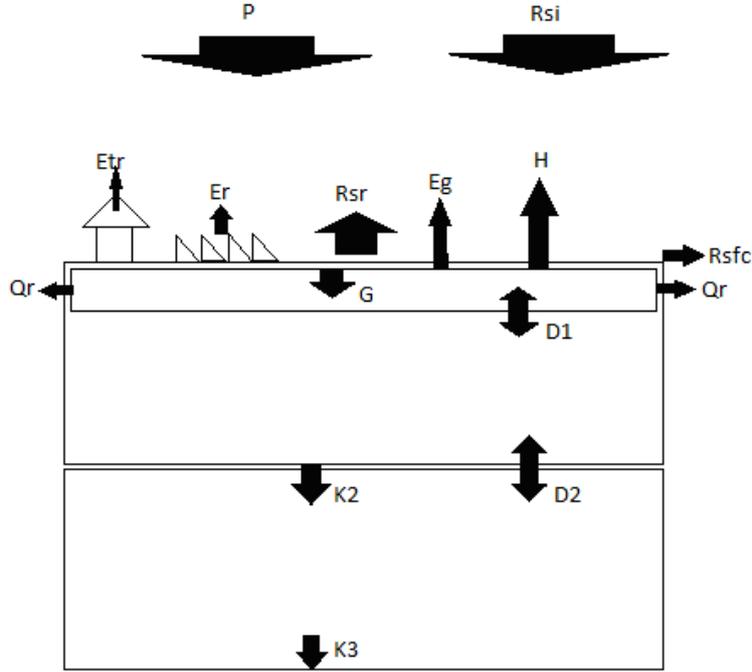


Figura 3.1: Esquema do modelo ISBA com três camadas de solo. Os símbolos são: radiações solares incidente e refletida (R_{si} , R_{sr}), fluxo de calor sensível (H), fluxos de calor latente de evapotranspiração (E_{tr} , E_r , E_g), precipitação (P), fluxo de calor para o solo (G), *run-off* (Q_r), *run-off* superficial (R_{sfc}), difusões verticais entre camadas (D_1 , D_2), drenagens gravitacionais (K_2 , K_3). Fonte: Dornelles Vissoto Junior (2003).

difusão vertical de umidade do solo entre as camadas, K_2 é a drenagem gravitacional de umidade do solo para a camada w_3 e K_3 é drenagem gravitacional de umidade do solo pela base da camada w_3 .

Na figura (3.1) é apresentado um esquema dos fluxos do modelo utilizado nesta dissertação, já na figura (3.2) são mostradas as principais variáveis.

A seguir, os termos, as variáveis e os coeficientes do sistema de equações ISBA é detalhado. Na equação (3.1),

$$C_T = \frac{1}{\frac{1-veg}{C_G} + \frac{veg}{C_V}}, \quad (3.7)$$

onde veg é a fração de área com cobertura vegetal projetada e planta, o coeficiente térmico da vegetação é $C_V = 10^{-3} \text{K m}^2 \text{J}^{-1}$ (Noilhan e Planton, 1989), o coeficiente térmico do solo é

$$C_G = C_{Gsat} \left(\frac{w_{sat}}{w_2} \right)^{\frac{b}{2 \log 10}}, \quad (3.8)$$

e $C_V = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{K m}^2 \text{J}^{-1}$ de acordo com Manzi e Planton (1994). Valores de C_{Gsat} ,

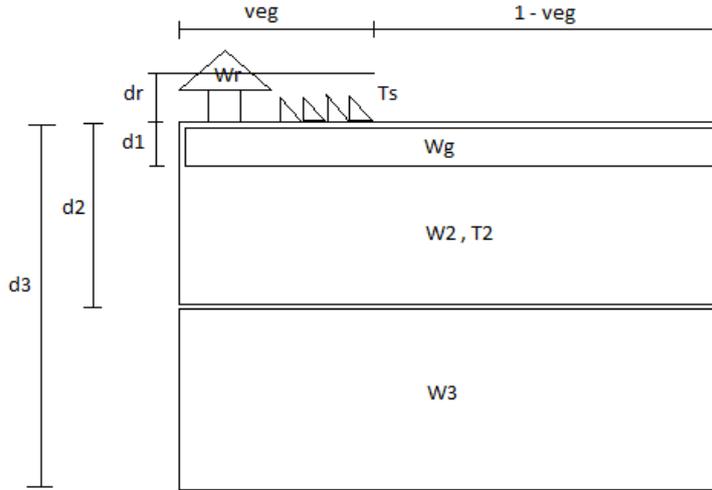


Figura 3.2: Variáveis do modelo ISBA com três camadas de solo. Os símbolos são: temperatura na interface superfície-atmosfera (T_s), temperatura média da camada de raízes (T_2), umidade volumétrica na camada superficial do solo de profundidade d_1 (W_g), umidade média da camada de raízes de profundidade d_2 (w_2), umidade média da camada sub-raízes (w_3), profundidade total das camadas (d_3), umidade nas plantas (w_r), altura da vegetação (d_r) e fração do terreno coberta pela vegetação (veg). Fonte: Dornelles Vissoto Junior (2003).

w_{sat} e b para vários tipos de solo podem ser encontrados em Clapp e Hornberger (1978). Neste trabalho foram usados os seguintes valores medidos em laboratório para uma plantação de soja no Paraná (Prevedello, 2003): $C_{Gsat} = 3,6 \times 10^{-6} \text{K m}^2 \text{J}^{-1}$, $w_{sat} = 0,48$ e $b = 8,8$.

A radiação líquida na superfície (R_n), quando não medida diretamente, deve ser estimada como a soma das radiações absorvidas provenientes da radiação global (R_G) e radiação infra-vermelha atmosférica (R_A), subtraídas da radiação infra-vermelha emitida:

$$R_n = R_G(1 - \alpha) + \epsilon(R_A - \sigma T_s^4), \quad (3.9)$$

onde o albedo (α) e a emissividade (ϵ) combinam a refletividade do solo e da vegetação, e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Os fluxos turbulentos de calor e de vapor são calculados pelas fórmulas clássicas de transferência aerodinâmica. Para o fluxo de calor sensível:

$$H = \rho_a c_p C_H V_a (T_s - T_a), \quad (3.10)$$

onde c_p , ρ_a , V_a e T_a são respectivamente, calor específico, densidade do ar, velocidade

do vento e temperatura atmosférica na altura z_a . C_H é o coeficiente de difusão turbulenta de escalares (calor e umidade) que, juntamente com o coeficiente de difusão turbulenta de quantidade de movimento C_D , depende da condição de estabilidade atmosférica. Este coeficiente foi implementado de acordo com a versão modificada do ISBA original por Noilhan e Mahfouf (1996) baseados na formulação de Louis (1979) com as modificações realizada por Mascart et al. (1995):

$$C_D = C_{DN}F_m, \quad (3.11)$$

$$C_H = C_{DN}F_h, \quad (3.12)$$

sendo,

$$C_{DN} = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]^2}, \quad (3.13)$$

onde k é a constante de Von Karman e z_0 é a altura de rugosidade.

Para quantidade de movimento:

$$F_m = \begin{cases} 1 - \frac{10Ri}{1+C_m\sqrt{|Ri|}} & , se Ri \leq 0, \\ \frac{1}{1+\frac{10Ri}{\sqrt{1+5Ri}}} & , se Ri > 0. \end{cases} \quad (3.14)$$

E para calor/umidade:

$$F_h = \begin{cases} \left[1 - \frac{15Ri}{1+C_h\sqrt{|Ri|}}\right] \times \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_{0h}}\right)}\right] & , se Ri \leq 0, \\ \frac{1}{1+15Ri\sqrt{1+5Ri}} \times \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_{0h}}\right)}\right] & , se Ri > 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

Ri é o número de Richardson, calculado em termos da variável de estabilidade de Obukov $\zeta = z/L$ como:

$$Ri = \zeta \text{ para o caso estável, e } Ri = \frac{\zeta(0,74 + 4,7\zeta)}{(1 + 4,7\zeta)^2} \text{ para o caso instável.}$$

O comprimento de Obukhov L é calculado por:

$$L = \frac{z}{Ri} \frac{\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \psi_h\left(\frac{z_0}{L}\right)\right]}{\left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right)\right]^2}. \quad (3.16)$$

As funções de estabilidade para quantidade de movimento ψ_m e calor/umidade ψ_h são:

$$\psi_m(\zeta) = \ln \left[\left(\frac{1 + (1 - \gamma_m \zeta)^{\frac{1}{4}}}{2} \right)^2 \left(\frac{1 + (1 - \gamma_m \zeta)^{\frac{1}{2}}}{2} \right) \right] - 2 \arctan(1 - \gamma_m \zeta)^{\frac{1}{4}} + \frac{\pi}{2}, \quad (3.17)$$

para condições instáveis, e

$$\psi_m(\zeta) = -\beta \zeta. \quad (3.18)$$

para condições estáveis.

$$\psi_h(\zeta) = \ln \left[\left(\frac{1 + (1 - \gamma_h \zeta)^{\frac{1}{2}}}{2} \right)^2 \right], \quad (3.19)$$

para condições instáveis, e

$$\psi_h(\zeta) = -\frac{\beta \zeta}{R} \quad (3.20)$$

para condições estáveis. Os valores das constantes são $\beta = 4,7$, $R = 0,74$, $\gamma_m = 15$ e $\gamma_h = 9$. No presente trabalho as rugosidades utilizadas foram $z_0 = 0,064$ m e $z_{0h} = 0,008661$ m. Note que a expressão para o comprimento L é implícita, o que exige uma solução iterativa.

Os coeficientes C_m e C_h para o caso instável são dados por:

$$C_m = 10 C_m^* C_{DN} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{p_m}, \quad (3.21)$$

$$C_h = 15 C_h^* C_{DN} \left(\frac{z}{z_{0h}} \right)^{p_h} \times \left[\frac{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{z}{z_{0h}} \right)} \right]. \quad (3.22)$$

Onde C_m^* , C_h^* , p_m e p_h são funções apenas de,

$$\mu = \ln \left(\frac{z_0}{z_{0h}} \right), \quad (3.23)$$

da seguinte maneira:

$$C_h^* = 3.2165 + 4.3431 \times \mu + 0.5360 \times \mu^2 - 0.0781 \times \mu^3, \quad (3.24)$$

$$C_m^* = 6.8741 + 2.6933 \times \mu - 0.3601 \times \mu^2 + 0.0154 \times \mu^3, \quad (3.25)$$

$$p_h = 0.5802 - 0.1571 \times \mu + 0.0327 \times \mu^2 - 0.0026 \times \mu^3, \quad (3.26)$$

$$p_m = 0.5233 - 0.0815 \times \mu + 0.0135 \times \mu^2 - 0.0010 \times \mu^3. \quad (3.27)$$

Os detalhes da dedução e cálculos acima foram omitidos e podem ser encontrados em Businger et al. (1971), Noilhan e Mahfouf (1996) e Vissotto (2003).

O fluxo de vapor de água (E) é a soma da evaporação do solo (E_g) e evapotranspiração (E_v):

$$E_g = (1 - veg)\rho_a C_H V_a [h_u q_{vsat}(T_s) - q_a], \quad (3.28)$$

$$E_v = veg \rho_a C_H V_a h_v [q_{vsat}(T_s) - q_a], \quad (3.29)$$

onde $q_{vsat}(T_s)$ é a umidade específica saturada na temperatura T_s e q_a a umidade específica na altura z_a . A umidade relativa (h_u) na superfície está relacionada com a umidade superficial do solo (w_g) e h_v é o chamado coeficiente de Halstead.

Segundo Noilhan e Planton (1989) a evaporação na superfície ocorre a uma taxa potencial quando a umidade do solo atinge o valor da capacidade de campo (w_{fl}), usualmente tomada como igual a $0,75 w_{sat}$, assim sendo eles supuseram:

$$h_u = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{w_g}{w_{fl}} \pi \right) \right] & , se \ w_g < w_{fl}, \\ 1 & , se \ w_g \geq w_{fl}. \end{cases} \quad (3.30)$$

Alternativamente à formulação de h_u acima, Vissotto (2003) propôs uma formulação empírica baseada em observações no Estado do Paraná. A umidade relativa do ar na superfície do solo, ou simplesmente umidade relativa do solo, representa a umidade relativa da porção de ar presente na camada de solo superficial de altura d_1 . Para a estimativa da umidade relativa do ar na superfície do solo, Vissotto (2003) utilizou a equação (3.28) reescrita como,

$$h_u = \frac{1}{q_{vsat}(T_s)} \left(\frac{E_g}{(1 - veg)\rho_a C_{dq} V_a} + q_{va} \right), \quad (3.31)$$

Primeira Série de Dados								
n	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0	$BIAS$	RMS	$MAXDIFF$
0	–	–	–	0.8768	0.0	-0.01577	0.1025	0.3057
1	–	–	–	0.6175	0.2006	-0.0079	0.0910	0.2556
2	–	–	-1.0522	2.0904	-0.2840	-0.0038	0.0866	0.2827
3	–	-0.9834	0.9767	0.7478	-0.0007	-0.0033	0.0865	0.2865
4	-8.7753	23.2227	-23.3745	11.3003	-1.6576	-0.0040	0.0863	0.2840

Segunda Série de Dados								
n	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0	$BIAS$	RMS	$MAXDIFF$
0	–	–	–	1.0371	0.0	-0.0281	0.1393	0.4253
1	–	–	–	0.6378	0.2580	-0.000029	0.1102	0.4284
2	–	–	-1.016	1.8556	-0.0651	0.000026	0.1014	0.4695
3	–	0.5864	-2.0787	2.4474	-0.1646	0.0000019	0.1013	0.4705
4	10.0654	-23.9236	19.0173	-5.0798	0.7643	0.0000041	0.0998	0.4867

Tabela 3.1: Coeficientes dos ajustes das curvas polinomiais realizado por Vissotto (2003), para duas séries de dados de SLOU.

e verificou que a dependência de h_u com a umidade do solo não se comportou como descrito pela equação (3.30) do modelo ISBA ao comparar a umidade relativa do solo calculada pelo modelo ISBA com valores estimados pela equação (3.31) através de duas séries de dados medidos no Estado do Paraná, para níveis do solo de 2 cm, 20 cm e 40 cm.

Vissotto (2003) verificou um equilíbrio de h_u com a umidade relativa do ar, principalmente na camada superficial do solo, sendo que para a estimativa de h_u ajustou curvas de regressão polinomial de h_u com a umidade relativa do ar y_a somente para a camada superficial do solo (2 cm) através da série,

$$h_u = a_n y_a^n + a_{n-1} y_a^{n-1} + \dots + a_{n-(n-1)} y_a^{n-(n-1)} + a_0, \quad (3.32)$$

onde n é o grau do polinômio de ajuste, realizando ajustes para $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$, $n = 4$ e calculando as estimativas dos erros de viés (BIAS) e raiz média quadrática (RMS). Para o ajuste de $n = 1$ adotou a equação considerando $a_0 = 0$. Vissotto (2003) adotou $n = 2$, com $a_0 \simeq -0.2840$, $a_1 \simeq 2.0904$, $a_2 \simeq -1.0522$ para a primeira série, e $a_0 \simeq -0.0651$, $a_1 \simeq 1.8556$, $a_2 \simeq -1.016$ para a segunda. Os resultados obtidos para duas séries de dados foi reproduzido na tabela (3.2).

A evapotranspiração pode ser um fluxo positivo ou negativo. Quando o fluxo é

negativo (da atmosfera para a vegetação) é suposto a ocorrência de orvalho na sua taxa potencial e o coeficiente de Halstead é tomado como $h_v = 1$,

$$E_v = veg\rho_a C_{dq} V_a [q_{vsat}(T_s) - q_{va}], \quad (3.33)$$

porém quando o fluxo é positivo (da vegetação para a atmosfera) o coeficiente de Halstead (h_v) leva em conta a evaporação direta (E_r) da vegetação, além da transpiração que deixa de ser igual a zero:

$$h_v = \frac{(1 - \delta)R_a}{R_a + R_s} + \delta, \quad (3.34)$$

$$E_{tr} = veg \frac{1 - \delta}{R_a + R_s} [q_{vsat}(T_s) - q_a], \quad (3.35)$$

$$E_r = veg \frac{\delta}{R_a} [q_{vsat}(T_s) - q_a], \quad (3.36)$$

$$E_v = E_{tr} + E_r, \quad (3.37)$$

onde R_a , R_s e δ são, respectivamente, a resistência aerodinâmica, a resistência estomática e uma função de potência da chuva interceptada.

Segundo Deardorff (1978) a função de potência da chuva interceptada (δ) pode ser descrita da seguinte forma:

$$\delta = \left(\frac{w_r}{w_{rmax}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3.38)$$

onde w_r é a umidade retida na vegetação e w_{rmax} a máxima quantidade possível de umidade que a vegetação consegue reter. Manzi e Planton (1994) incluíram um parâmetro para controlar a razão de secamento (β) após eventos de chuva de maneira que à medida que o valor de β aumenta torna-se mais difícil esvaziar o reservatório de água da chuva interceptada pela vegetação, devido ao fato de que a água retida nas camadas mais baixas das folhas evapora lentamente, e assim sendo, δ diminui menos quando β for menor:

$$\delta = \frac{w_r}{(1 - \beta)w_r + \beta w_{rmax}}, \quad (3.39)$$

Nas equações para fluxo positivo da evapotranspiração (3.34–3.36), a resistência

aerodinâmica é dada por:

$$R_a = \frac{1}{C_H V_a}. \quad (3.40)$$

A resistência estomática R_s do ISBA de Noilhan e Planton (1989) é calculada através da parametrização simplificada proposta por Jarvis (1976):

$$R_s = \frac{R_{smin}}{IAF} F_1 F_2^{-1} F_3^{-1} F_4^{-1}, \quad (3.41)$$

onde R_{smin} é a resistência mínima do estômato, IAF o índice de área foliar e F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , coeficientes que parametrizam a resposta do estômato a fatores puramente físicos (principalmente meteorológicos), sendo estes, respectivamente, a radiação, o estresse hídrico do solo, o déficit na pressão de vapor da atmosfera e a temperatura do ar. A chamada condutância estomática g_s é o inverso da resistência estomática:

$$g_s = \frac{1}{R_s}.$$

Mais adiante será apresentado um módulo do modelo que, a partir de g_s calculado acima, a assimilação de carbono é diagnosticada. O modelo integrado a este módulo será denominado de ISBA-gs.

O coeficiente F_1 mensura a influência da radiação fotossinteticamente ativa que é suposta igual a $0,55 R_G$ (Sellers et al., 1986). Noilhan e Planton (1989) realizaram seu cálculo segundo Dickinson (1984) da seguinte maneira:

$$F_1 = \frac{1 + f}{f + \frac{R_{smin}}{R_{smax}}}, \quad (3.42)$$

$$f = 0,55 \frac{R_G}{R_{GL}} \frac{2}{IAF}, \quad (3.43)$$

onde R_{GL} é um valor limite de 30 W m^{-2} para florestas e 100 W m^{-2} para culturas agrícolas. R_{smax} é a resistência máxima do estômato.

O coeficiente F_2 leva em conta o efeito do estresse hídrico do solo variando entre 0–1 quando a umidade na segunda camada de solo (w_2) de profundidade d_2 , varia entre os valores de $w_{wilt} - w_{cr}$, sendo w_{cr} o valor da umidade do solo definida como crítica igual $0,75 w_{sat}$ (Thompson et al., 1981) e w_{wilt} a umidade do ponto de

murchamento que inviabiliza a extração de água do solo pelas raízes:

$$F_2 = \begin{cases} 1 & , se w_2 > w_{cr}, \\ \frac{w_2 - w_{wilt}}{w_{cr} - w_{wilt}} & , se w_{wilt} \leq w_2 \leq w_{cr}, \\ 0 & , se w_2 < w_{wilt}. \end{cases} \quad (3.44)$$

O coeficiente F_3 representa o efeito do déficit de pressão de vapor da atmosfera sobre a abertura estomática. Seu cálculo foi proposto por Jarvis (1976) para coníferas e reproduzido por Sellers et al. (1986) da seguinte forma:

$$F_3 = 1 - g[e_{sat}(T_s) - e_a], \quad (3.45)$$

onde g é um parâmetro empírico dependendo da espécie de planta. Noilhan e Planton (1989) encontraram o valor de $0,025 \text{ H Pa}^{-1}$ para uma floresta de coníferas.

O coeficiente F_4 introduz a dependência estomática com relação à temperatura do ar, onde, seguindo a abordagem de Dickinson (1984):

$$F_4 = 1 - 0,0016(298 - T_a)^2. \quad (3.46)$$

Contabilizado o fluxo de vapor de água, calcula-se então o fluxo de calor latente LE :

$$LE = L(E_g + E_v), \quad (3.47)$$

onde L é o calor latente de evaporação da água.

Nas equações prognósticas para as umidades w_g , w_2 , e w_3 das 3 camadas do solo, K_2 e K_3 são as drenagens gravitacionais, D_1 e D_2 são coeficientes de difusão vertical, e C_1 é um coeficiente adimensional. A densidade da água líquida é ρ_w , d_1 é a profundidade do solo superficial, d_2 é a profundidade da zona de raízes e d_3 é a profundidade total do solo. Esta última pode ser considerada como a profundidade onde a variação da umidade no tempo pode ser desprezada. Esta informação geralmente é determinada através do perfil de umidade do solo, o que nem sempre está disponível. Outra maneira de se determinar a profundidade d_3 é através de testes de sensibilidade do modelo. O conteúdo volumétrico de água em cada reservatório deve ser menor que o conteúdo de água na saturação w_{sat} que é função das proprie-

dades granulométricas do solo. A transpiração na vegetação pode ocorrer enquanto a umidade na zona de raízes for superior à do ponto de murchamento (w_{wilt}).

A precipitação que atinge o solo (P_g) é a soma da precipitação que atinge diretamente o solo ($(1 - veg)P$) à parte da água interceptada pela vegetação que escoo para o solo após saturação do dossel (R_r):

$$P_g = (1 - veg)P + R_r. \quad (3.48)$$

A precipitação interceptada pela vegetação é:

$$P_r = veg P, \quad (3.49)$$

e quando $w_r > w_{rmax}$ ocorre o escoamento superficial da vegetação para o solo:

$$R_r = (w_r - w_{rmax}) \frac{\rho_w d_r}{\Delta t}, \quad (3.50)$$

onde w_{rmax} depende da densidade da cobertura vegetal e pode ser calculada de acordo com Dickinson (1984):

$$W_{rmax} = 0,2 veg IAF. \quad (3.51)$$

O parâmetro IAF da vegetação, pode ser calculado em função do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para vegetação herbácea:

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{1 - \frac{NDVI}{0,915}}{0,83}\right)}{0,96}. \quad (3.52)$$

E para cobertura com árvores:

$$IAF = 1,625 \exp\left(\frac{NDVI}{0,34}\right). \quad (3.53)$$

A taxa de infiltração (I) é dada por,

$$I = P_g - R_{sfc}, \quad (3.54)$$

e os coeficientes de drenagem (K 's) e de difusão vertical (D 's) são escritos como:

$$K_2 = \frac{C_3 d_3}{\tau d_2} \max[0, (w_2 - w_{fc})], \quad (3.55)$$

$$K_3 = \frac{C_3 d_3}{\tau (d_3 - d_2)} \max[0, (w_3 - w_{fc})], \quad (3.56)$$

$$D_1 = \frac{C_2}{\tau} (w_g - w_{geq}), \quad (3.57)$$

$$D_2 = \frac{C_4}{\tau} (w_2 - w_3), \quad (3.58)$$

onde τ representa a constante de restauração para um dia. O conteúdo volumétrico superficial de água no balanço entre as forças gravitacionais e capilares, é representado por w_{geq} e w_{fc} é a unidade da capacidade de campo.

Os parâmetros adimensionais do método de força-restauração C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , e os parâmetros w_{geq} , w_{wilt} e w_{fc} estão relacionados com as propriedades hidráulicas/granulométricas e com a umidade do solo, através das expressões e valores apresentados em Clapp e Hornberger (1978), Prevedello (1996), van Genuchten (1980), Vissotto (2003), e resumidos abaixo e na tabela (3.2) para o solo no estado do Paraná estudado nesta dissertação (Prevedello, 2003). Assim,

$$C_1 = \frac{2d_1}{d} = C_{1sat} \left(\frac{w_{sat}}{w_g} \right)^{\frac{b}{2}+1}, \quad (3.59)$$

$$C_2 \approx \frac{\tau_d(1-m)K_{sat}}{d_1^2 \alpha m (w_{sat} - w_{wilt})} \Theta^{\frac{1}{2}-\frac{1}{m}} \left[\left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}}\right)^{-m} + \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}}\right)^m - 2 \right]. \quad (3.60)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad (3.61)$$

$$\Theta = \frac{w - w_{wilt}}{w_{sat} - w_{wilt}}. \quad (3.62)$$

O parâmetro C_3 é calculado por:

$$C_3 = \frac{5,32 X_{clay}^{-1,042}}{d_2}, \quad (3.63)$$

onde X_{clay} é a fração de argila na camada.

C_4 é calculado por:

Propriedade	Valor	Unidade
Indeformada		
w_{sat}	0,4800	$m^3 m^{-3}$
w_{fc}	0,4095	$m^3 m^{-3}$
w_{wilt}	0,2125	$m^3 m^{-3}$
<i>Porosidade total</i>	0,48	–
<i>Massa esp. solo seco</i>	1447	$kg m^{-3}$
<i>Massa esp. partículas</i>	2780	$kg m^{-3}$
Deformada		
α	28,469	m^{-1}
n	1,3814	–
K_s	36	$cm dia^{-1}$

Tabela 3.2: Propriedades do solo estudado.

j	β_j	α_j
0	$4,42 \times 10^{-0}$	
1	$4,88 \times 10^{-3}$	$-2,57 \times 10^{-1}$
2	$5,93 \times 10^{-4}$	$8,86 \times 10^{-3}$
3	$-6,09 \times 10^{-6}$	$-8,13 \times 10^{-5}$

Tabela 3.3: Coeficientes da regressão para obtenção de C_{4ref} a partir da equação (3.67).

$$C_4 = C_{4ref} \bar{w}_{2,3}^{C_{4b}}, \quad (3.64)$$

onde

$$C_{4b} = 5.14 + 0.115 X_{clay}, \quad (3.65)$$

$$\bar{w}_{2,3} = \left[w_2^q \left(\frac{d_2}{d_3} \right) + w_3^q \frac{(d_3 - d_2)}{d_3} \right]^{\frac{1}{q}}, \quad (3.66)$$

com a potência q definida experimentalmente igual a 6 por Boone et al. (1999);

$$C_{4ref} = \frac{2(d_3 - d_2)}{(d_2 d_3^2)} \log_{10}^{-1} \left[\beta_0 + \sum_{j=1}^3 (\beta_j X_{sand}^j + \alpha X_{clay}^j) \right], \quad (3.67)$$

onde β e α são os coeficientes determinados por regressão e mostrados na tabela (3.3).

Em aplicações onde há interesse em se conhecer o escoamento superficial Q_r gerado pontualmente, que é o caso de acoplamento do ISBA a modelos hidrológicos,

é necessária a previsão deste *runoff* a partir das soluções das equações prognósticas do ISBA.

Esta abordagem foi apresentada por Habets et al. (1999b) onde os autores acoplaram o modelo ISBA a um modelo de circulação global (MCG) utilizando um esquema denominado *Variable Infiltration Capacity* (VIC) (Wood et al., 1992) e em Habets e Saulnier (2001) onde foi utilizado para a parametrização do escoamento superficial o modelo hidrológico TOPMODEL (Beven e Kirkby, 1979). Vissotto (2003) adaptou este modelo para casos em que a superfície é aproximadamente horizontal e homogênea. Segundo esta abordagem o escoamento superficial é:

$$Q_r = \begin{cases} P - (w_{sat} - w_2)h_e & , se P > P_{ref}, \\ P - (w_{sat} - w_{wilt})h_e + \left(\frac{P_{ref}-P}{w_{sat}-w_{wilt}}\right) & , se 0 < P \leq P_{ref}, \\ 0 & , se P = 0, \end{cases} \quad (3.68)$$

onde

$$P_{ref} = (w_{sat} - w_2)h_e = I, \quad (3.69)$$

h_e é a profundidade da segunda camada do solo (d_2) em unidade de precipitação, w_2 é a umidade antecedente do solo, w_{wilt} é a umidade no ponto de murchamento e w_{sat} é a umidade de saturação.

3.2 Modelagem do fluxo de CO₂

Nesta dissertação o fluxo de CO₂ é acoplado ao ISBA de duas formas diferentes (Jacobs, 1994; Jacobs et al., 1996): na primeira, um módulo chamado de A-gs utiliza um modelo fisiológico de fotossíntese para o consumo de CO₂, e a condutância estomática/transpiração são diagnosticadas a partir do resultado deste modelo; a segunda forma de cálculo, que denominamos módulo gs, usa forçantes meteorológicos para obter a condutância estomática e a transpiração, e o fluxo de CO₂ é diagnosticado a partir deste resultado. Após o acoplamento com o ISBA, as denominações dos modelos serão ISBA-A-gs, e ISBA-gs.

O objetivo do modelo fisiológico é simular a assimilação líquida de CO₂ (A_n) e a condutância estomática de vapor de água da folha (g_s) como função da densidade

do ar, concentração de CO_2 na superfície da folha, temperatura da folha, déficit de saturação na superfície da folha, radiação global e tipo de vegetação. O déficit de saturação (D_s) representa a diferença entre a umidade específica de saturação à temperatura da folha e a umidade específica do ar próximo à superfície da folha. Juntamente com A_n e g_s , o modelo calcula a concentração interna de CO_2 da folha.

A condutância estomática de vapor de água é estimada utilizando uma relação de fluxo-gradiente modificada para contabilizar o efeito de D_s na abertura dos estômatos. No caso da modelagem usada neste trabalho, foi necessário introduzir uma resposta ao estresse hídrico no solo (Calvet et al., 1998). Será mostrado como o efeito do estresse hídrico provocado pelo decréscimo de água no solo foi aplicado ao cálculo da condutância do mesófilo (g_m).

A condutância de vapor de água e a assimilação líquida de CO_2 não são homogêneas dentro do dossel pois a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é atenuada pela cobertura vegetal. Além disso, a temperatura da folha (T_s), a concentração de CO_2 no ar (C_s) e o déficit de saturação (D_s) podem variar dentro do dossel. Apesar destes efeitos de escada (da folha para o dossel) serem considerados neste trabalho, supõe-se que as variáveis forçantes do módulo fisiológico (T_s , C_s e D_s) não variam dentro da camada de cobertura vegetal.

No modelo acoplado ISBA-A-gs, T_s é a temperatura da superfície calculada a partir da aplicação do balanço de energia superficial como na versão do ISBA já apresentada. Na modelagem numérica, os parâmetros C_s e D_s na altura da copa da cobertura vegetal podem ser obtidos a partir de seus valores em um nível de referência e de uma relação de fluxo-gradiente, utilizando a resistência aerodinâmica calculada pelo ISBA e os fluxos de CO_2 e vapor de água do passo de tempo anterior. A atenuação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) através da cobertura vegetal também será considerada explicitamente no módulo.

Um efeito importante que deve ser considerado é a sensibilidade à concentração de CO_2 na atmosfera. Calvet et al. (1998) apontam que, do ponto de vista do balanço hídrico um aumento na concentração de CO_2 do meio tem dois efeitos imediatos conflitantes: o índice de área foliar (IAF) pode aumentar devido a um acréscimo na fotossíntese (pelo menos para plantas do tipo C3), e ao mesmo tempo, a condutância de vapor d'água da folha pode diminuir. O primeiro efeito tende a

aumentar a transpiração da cobertura vegetal como um todo, enquanto que o segundo tende a diminuir a transpiração das folhas individuais. A mudança resultante na evapotranspiração e na umidade do solo, pode ser totalmente diferente de um tipo de planta para outra para determinadas condições atmosféricas.

Além disso há um terceiro efeito relacionado ao *feedback* entre a transpiração e a umidade na zona de raízes (w_2). As mudanças na transpiração afetam a disponibilidade de umidade no solo, sendo que este efeito ocorre durante longos períodos de tempo e pode provocar diferenças sazonais no balanço hídrico resultante. Este *feedback* foi contabilizado por Calvet et al. (1998), que verificaram que, apesar de uma resposta intensa do índice de área foliar (*IAF*) para o enriquecimento da concentração de CO_2 no meio ambiente, a umidade no solo raramente sai de seu valor de referência porque as plantas limitam a condutância estomática de vapor de água através do fechamento dos estômatos, visando minimizar o efeito do aumento do índice de área foliar (*IAF*) sobre a transpiração.

Um aspecto importante dos modelos fisiológicos é a diferenciação metabólica entre tipos de vegetação (Jacobs, 1994). As plantas podem ser divididas em três grandes grupos conforme o seu metabolismo fotossintético: plantas C3, plantas C4 e plantas CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*). As plantas do grupo C3 têm como primeiro produto da fixação de CO_2 um composto com três carbonos, abrangendo as plantas que possuem somente a enzima Rubisco pertencente ao Ciclo de Calvin como alternativa para a fixação do carbono. A reação de carboxilação da enzima Rubisco resulta na produção de duas moléculas idênticas do mesmo composto de três carbonos, o ácido 3-fosfo-glicérico. O grupo C3 é composto pela maior parte das plantas conhecidas atualmente. As plantas pertencentes aos grupos C4 e CAM diferem basicamente das plantas do grupo C3 por possuírem duas reações de carboxilação: a já citada carboxilação promovida pela enzima Rubisco e a carboxilação promovida pela enzima Fosfoenolpiruvato Carboxilase (PEPcase). As plantas do grupo C4 são assim denominadas por possuírem um ciclo de fixação de carbono apresentando uma primeira reação de carboxilação que resulta em um composto de quatro carbonos – o ácido oxaloacético – produto da reação da enzima PEPcase. As plantas do grupo CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*) possuem um ciclo de fixação muito semelhante ao das plantas do grupo C4, sendo assim denominadas devido a

este ciclo metabólico ter sido descoberto primeiramente na família das Crassuláceas.

Acredita-se que as plantas dos grupos C4 e CAM foram derivadas das plantas do grupo C3, e surgiram no final do período Cretáceo quando ocorreu um drástico declínio na concentração de CO₂ atmosférico. As plantas do grupo CAM possuem maior eficiência no uso da água, necessitando menor quantidade deste recurso para acumular matéria seca. As plantas do grupo C4 apresentam um comportamento intermediário em relação as plantas dos grupos CAM e C3. Muitas plantas aquáticas são do grupo CAM, o que pode ser explicado pelo fato destas plantas necessitarem de menores concentrações de CO₂ para realizarem fotossíntese líquida positiva. Nos recentes modelos, é de fundamental importância calcular valores realistas da condutância dos estômatos de folhas das plantas dos grupos C3, C4 e CAM, para que assim sejam obtidas melhores estimativas dos balanços de energia, água e carbono.

3.2.1 Módulo A-gs

Nos modelos do tipo A-gs, a assimilação fotossintética líquida (A_n) é modelada como resposta a fatores ambientais, e através do seu valor é calculada a condutância de vapor d'água nos estômatos (g_s) ou o seu inverso, a resistência estomática (R_s), e a consequente transpiração (Collatz et al., 1991).

No presente trabalho o módulo A-gs implementado é o proposto por Jacobs et al. (1996), originalmente para descrever os processos fisiológicos na escala da folha.

A condutância de vapor de água nos estômatos é um parâmetro de fundamental importância na maioria dos modelos desenvolvidos para calcular a evapotranspiração. Com a condutância estomática g_s calculada, é possível se estimar a transpiração que acopla o módulo A-gs ao balanço de massa do SVAT:

$$g_s = \frac{E_{tr}}{\rho(q_i - q_s)}, \quad (3.70)$$

onde E_{tr} é a taxa de transpiração, ρ_a a densidade do ar, q_i a umidade específica nas plantas e q_s é a umidade específica do ar próxima à superfície da folha. Portanto, g_s controla a troca de vapor d'água entre as plantas e o meio ambiente.

A abertura dos estômatos é influenciada pelas condições ambientais e por propriedades das plantas tais como: luz, CO₂ disponível, temperatura, umidade do ar,

idade da folha e umidade do solo. Baseando-se no fato de que a difusão do vapor d'água para fora da folha e a absorção do CO₂ utilizado para a fotossíntese ocorrem pelo mesmo caminho, pode-se também definir calcular a condutância estomática g_s a partir da assimilação fotossintética por:

$$g_s = \frac{1,6A_n}{C_s - C_i}, \quad (3.71)$$

sendo A_n a taxa líquida de fotossíntese, C_i e C_s as concentrações de CO₂ dentro e fora da folha respectivamente. A concentração de CO₂ no meio ambiente (C_s) foi definida neste trabalho como igual a 744,8 mg m⁻³ (Baesso, 2011).

O fator 1,6 é devido à diferença entre a difusividade do CO₂ e do vapor d'água. Neste caso, a difusão é assumida como sendo estritamente normal ao gradiente de concentração, de modo que o fator de conversão entre a condutância de vapor de água e a condutância de CO₂ torna-se igual à razão dos coeficientes de difusividade de CO₂ e H₂O no ar. Assim, uma vez calculado A_n , calcula-se g_s e E_{tr} pelas relações acima.

Apesar de sua simplicidade a correlação das variáveis da equação (3.71) não é trivial, sendo que na terminologia de Raschke (1979) os suplementos físicos e químicos não estão necessariamente correlacionados. A formulação também não leva em conta as interações ocorridas entre as difusões do CO₂ e vapor d'água, tampouco as interações entre a difusão das moléculas e a parede do poro estomático. Há ainda que se levar em conta o escoamento viscoso decorrente do pequeno gradiente de pressão dentro da folha.

A suposição de que o comportamento estomático e a assimilação líquida de CO₂ estão acoplados baseia-se na premissa fundamental de que as plantas irão operar de tal forma a maximizar o ganho de carbono minimizando a perda de água. Esta correlação não implica necessariamente uma relação causal mas pode ser considerada como o efeito prático da estratégia da planta de otimizar o uso dos recursos (Jacobs et al., 1996).

Parâmetros do módulo A-gs

Nesta seção apresentamos os parâmetros primários usados mais à frente nesta seção.

O módulo A-gs original de Jacobs (1994) é válido para condições ideais de umi-

Variável (X)	$X(25^\circ\text{C})$	Q_{10}	$T_1(^\circ\text{C})$	$T_2(^\circ\text{C})$
$\varepsilon_0(\text{mg CO}_2 \text{ J}^{-1} \text{ PAR})$	0,017			
$\Gamma(\mu\text{mol mol}^{-1})$	45	1,5		
$A_{m,max}(\text{mg m}^{-2} \text{ s}^{-1})$	2,2	2,0	8	38
$g_m(\text{mm s}^{-1})$	0,1–20	2,0	5	36
f_0	0,2–1			
$D_{max}(\text{g kg}^{-1})$	10–600			
$g_c(\text{mm s}^{-1})$	0,0–1,5			

Tabela 3.4: Valores típicos dos parâmetros utilizados no modelo A-gs para plantas C3.

dade no solo. A condutância dos estômatos e a assimilação líquida de CO_2 dependem das concentrações interna e externa de CO_2 nas folhas. Van Wijk et al. (2000) demonstrou que a utilização da umidade relativa do ar (y_a) não é adequada para a modelagem dos fluxos gasosos foliares, e usou o déficit de saturação folha-ar (D_s) para caracterizar o efeito da umidade do ar na condutância estomática. Outras variáveis que governam a abertura do estômato e sua sensibilidade para o déficit de saturação folha-ar são: a condutância do mesófilo (g_m), o déficit máximo de saturação folha para o ar (D_{max}) e o fator de conexão para $D_s = 0$ (f_0).

A condutância do mesófilo (g_m) condiciona a fotossíntese e a condutância máxima do estômato. A razão $1/D_{max}$ representa a sensibilidade do estômato com relação à umidade do ar. O parâmetro f_0 condiciona o valor do CO_2 interno que é usado para calcular a taxa de fotossíntese em condições de saturação de luz e também no cálculo da diferença entre CO_2 interno e externo que relaciona a assimilação líquida de CO_2 com a condutância de vapor d'água no estômato na equação (3.71). A tabela (3.4) apresenta a abrangência de valores dos parâmetros utilizados na modelagem A-gs dependendo do tipo de planta.

Para a modelagem A-gs no presente trabalho foi necessária a definição do déficit máximo de saturação folha para o ar (D_{max}), do fator de conexão para $D_s = 0$ (f_0) e da eficiência máxima de conversão da luz (ε_0). Um valor típico para D_{max} é 45g kg^{-1} (Choudhury e Monteith, 1986). Usando este valor para D_{max} , f_0 pode ser estimado. Vários estudos da razão (C_i/C_s) foram realizados para condições onde D_s se encontra na faixa $7,5\text{--}12,5\text{g kg}^{-1}$, supondo-se que o valor de $f = 0,7$ para plantas C3 é válido quando o valor de D_s se encontra próximo de 10g kg^{-1} . Foi definido f_0 em torno de 0,85 para plantas C3, o que é razoável comparando com os dados

apresentados em Morison e Gifford (1983).

(Jacobs, 1994) observa que o valor da eficiência máxima de conversão da luz (ε_0) é baseado na quantidade do requerimento teórico do ciclo de Calvin de $\approx 0,025\text{mg}$ por unidade de energia em Joules na banda do comprimento de onda da *radiação fotossinteticamente ativa* (PAR) ($\text{mg J}^{-1}\text{PAR}$). Goudriaan et al. (1985) e Farquhar et al. (1980) acrescentam que este requerimento teórico deve ser corrigido por um fator de perda devido à absorção por tecidos que não fazem parte da fotossíntese. Goudriaan et al. (1985) sugerem, para plantas C3, o valor da eficiência máxima de conversão da luz (ε_0) de aproximadamente $0,017\text{ mg J}^{-1}\text{ PAR}$.

Resposta dos parâmetros à temperatura

A dependência da condutância estomática à temperatura da folha é calculada através de um parâmetro Q_{10} definido como o crescimento proporcional de um valor parâmetro em relação ao crescimento de 10°C na temperatura, aplicada às variáveis do modelo fotossintético A-gs. A influência da temperatura na fotossíntese é computada através das dependências em relação à temperatura do ponto de compensação (Γ), condutância do mesófilo (g_m) e capacidade máxima de fotossíntese ($A_{m,max}$). Berry e Raison (1981) propuseram uma função resposta potência de Q_{10} e com variação em relação à variação da temperatura:

$$X(T) = X(25^\circ\text{C})Q_{10}^{\frac{T-25}{10}}, \quad (3.72)$$

sendo T a temperatura em graus Celsius, $X(T)$ o valor da variável X na temperatura T e $X(25^\circ\text{C})$ o valor de X na temperatura $T = 25^\circ\text{C}$.

A equação (3.72) é utilizada diretamente para descrever a resposta do ponto de compensação (Γ) à temperatura. Para os parâmetros g_m e $A_{m,max}$, a equação (3.72) é modificada utilizando-se os parâmetros de inibição dados por Collatz et al. (1992),

$$X(T) = \frac{X(25^\circ\text{C})Q_{10}^{\frac{T-25}{10}}}{1 + \exp[0,3(T_1 - T)]1 + \exp[0,3(T - T_2)]}, \quad (3.73)$$

onde T_1 e T_2 são as temperaturas de inibição (ver tabela 3.4).

T_1 e T_2 denotam as temperaturas a partir das quais é verificada características fisiológicas de inibição da condutância estomática. É assumido uma proporcionali-

dade com relação a capacidade catalítica da enzima Rubisco segundo Collatz et al. (1992). Para temperaturas fora da faixa ideal de cada espécie, as plantas apresentam inibição da fotossíntese, translocação mais lenta de carboidratos, menor respiração, inibição do metabolismo de proteínas, geração de espécies reativas de oxigênio, crescimento lento e murcha foliar. Estas modificações são causadas por disfunções em processos metabólicos e pela inibição de reações enzimáticas.

Taxa de fotossíntese

A parte fotossintética do modelo A-gs do presente trabalho é baseada em Goudriaan et al. (1985) que descreveram as respostas essenciais da fotossíntese para plantas C3 e C4. A aproximação fotossintética pressupõe a distinção entre duas condições: radiação fotossintética ativa (RFA) sendo fator limitante (na saturação da concentração de CO₂) e CO₂ sendo fator limitante (na saturação de intensidade de luz).

A RFA atravessa a atmosfera praticamente sem sofrer redução por absorção, sendo esta a maior componente da radiação solar global incidente, podendo chegar a aproximadamente 50% de todo o espectro segundo Pereira et al. (2002). Na literatura científica é comum encontrar valores da RFA estimados através da radiação global medida rotineiramente em estações meteorológicas automáticas. Outra maneira utilizada para estimar a RFA é através do cálculo da densidade de fluxo de fótons relativa, ou seja da razão $RFA/(\text{radiação global})$ proposta por McCree (1972). Algumas pesquisas evidenciaram a necessidade de calibrações locais da relação $RFA/(\text{radiação global})$ devido a diferenças existentes entre distintas regiões.

Em muitos casos apresentados na literatura científica para cálculos de eficiência fotossintética, a RFA é considerada uma fração constante da radiação solar global. Szeicz (1974) e Monteith e Unsworth (2013) consideraram a fração $RFA/(\text{radiação global})$ da ordem de 50%, porém outros resultados foram encontrados por demais autores, com razões variando da ordem de 44%–69% (Britton e Dodd, 1976; Pereira et al., 1982; de Assis e Mendez, 1989; Papaioannou et al., 1996). Moon (1940) foi um dos primeiros pesquisadores a apresentar a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) com valor de 44% da radiação global incidente dentro da faixa espectral de 0,4–0,7 μm . A relação entre RFA e radiação solar global foi determinada por de Assis e Mendez (1989) em Pelotas no Rio Grande do Sul, onde a RFA foi estimada

com razão $RFA/($ radiação global) de 47%.

Gallegos et al. (2004) publicaram os primeiros resultados registrados em San Miguel na província de Buenos Aires. Verificaram que a razão $RFA/($ radiação global) atingiu 51% para condições nubladas, 47% céu parcialmente nublado e 45% em condições de céu claro, mostrando que a composição espectral da radiação solar no nível do solo apresenta diferenças dependendo das condições atmosféricas.

Diferentes autores têm estudado a densidade de fluxo global de fótons fotossintéticos na horizontal sob diversos aspectos. Meek et al. (1984) afirmam que a obtenção de equações empíricas de estimativa é de grande importância para inúmeras regiões do mundo onde não existem sensores disponíveis para medição da RFA. Ting e Giacomelli (1987) sugeriram equações empíricas para estimar as componentes direta e difusa da RFA a partir de valores da radiação solar total. GOMES et al. (2000) acrescentam ainda que a razão $PAR/($ radiação global) não é constante e varia em função da densidade de fluxo e do horário do dia.

RFA como fator limitante

Com RFA sendo fator limitante na modelagem fotossintética, A_n é linearmente relacionada com a quantidade absorvida,

$$A_n = \varepsilon I_a - R_d, \quad (3.74)$$

onde A_n é a taxa líquida de fotossíntese, ε é a quantidade inicial de eficiência e R_d é a taxa de respiração (independente da luz). R_d do modelo A-gs de Jacobs (1994) é parametrizada da seguinte maneira (Keulen et al., 1986):

$$R_d = \frac{A_m}{9}. \quad (3.75)$$

A eficiência da conversão da luz pode ser obtida por

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{C_i - \Gamma}{C_i - 2\Gamma}, \quad (3.76)$$

ou por (Goudriaan et al., 1985)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{C_s - \Gamma}{C_s + 2\Gamma}, \quad (3.77)$$

onde ε_0 é a quantidade máxima de eficiência e Γ a concentração de compensação de CO_2 .

A equação (3.77) é derivada a partir de considerações bioquímicas. A concentração interna de CO_2 pode ser utilizada, desde que $I_a \approx 0$ tal que $C_i \approx C_s$. Γ supre o efeito da foto-respiração. Sabe-se que ε aumenta com o aumento da concentração de CO_2 devido à supressão da foto-respiração (Jacobs, 1994).

Refinamento do cálculo da respiração

Neste trabalho buscou-se aperfeiçoar a modelagem da respiração, de maneira a contabilizar explicitamente a influência da temperatura neste processo. A respiração total da planta é a soma da respiração de crescimento com a de manutenção. A respiração de crescimento é necessária para a síntese de novos tecidos, enquanto que a respiração de manutenção fornece a energia necessária para manter os tecidos existentes saudáveis. A proporção da respiração de crescimento em relação à respiração total varia entre espécies. Segundo Ryan et al. (1994) a respiração aumenta com a temperatura devido ao aumento da velocidade das reações enzimáticas, sendo que muitos fisiologistas ambientais utilizam um modelo exponencial simples de resposta à temperatura ao invés de utilizar o modelo de Arrhenius mais formal, devido ao fato de que eles concordam aproximadamente entre si na faixa entre 0 e 50°C.

van't Hoff (1898) (VH98) desenvolveu uma equação exponencial para descrever a dependência da temperatura nas reações químicas. O parâmetro Q_{10} tem sido amplamente utilizado no estudo da respiração vegetal. Este parâmetro representa a relação da respiração medida a uma determinada temperatura e a respiração medida a 10°C inferiores desta:

$$R_d = R_{ref} Q_{10}^{\frac{T - T_{ref}}{10}}, \quad (3.78)$$

onde T_{ref} é a temperatura de referência e R_{ref} é a taxa de respiração à temperatura T_{ref} .

Embora o parâmetro Q_{10} seja bem sucedida em muitos estudos, alguns pesqui-

sadores argumentam que Q_{10} é função da temperatura. Valores de Q_{10} geralmente diminuem com o aumento da temperatura. Em alguns modelos Q_{10} varia com a temperatura da seguinte maneira: aumento linear de 2,0–2,5 entre 5,0–10,0°C, constante e igual a 2,0 entre 10,0–20,0°C e uma redução linear de 2,0–1,5 entre 20,0–40,0°C.

Para o cálculo da respiração nesta dissertação no experimento realizado nos arredores de Buenos Aires na Argentina utilizando a equação (3.78), foi necessário a definição dos parâmetros T_{ref} , R_{ref} e Q_{10} . Foi então calculada a média da temperatura do ar quando o fluxo de CO_2 medido teve valores negativos (fluxo de CO_2 no sentido da planta para o meio ambiente) durante o período modelado. O valor encontrado foi 23°C e este foi definido como sendo o valor para a T_{ref} . Através de regressão linear foi definido o valor de $Q_{10} = 1,9$. Para definir o valor de R_{ref} foi calculada a média da respiração no período ($R_{ref} = 0,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

No experimento de campo realizado na Fazenda São Lourenço (SLOU) no município de Santa Terezinha do Itaipu no estado do Paraná, não houve medições de fluxos de CO_2 inviabilizando assim a parametrização de R_{ref} . Porém, como a vegetação em estudo é a mesma em ambas as localidades, e a respiração depende em grande parte das características fisiológicas da vegetação, utilizou-se na modelagem para SLOU os valores de referência R_{ref} e T_{ref} parametrizados na plantação de soja estudada em Buenos Aires na Argentina.

A modelagem proposta acima para a respiração será comparada oportunamente neste texto com a original de Jacobs (1994).

CO_2 como fator limitante

Segundo Thornley et al. (1976) para altas intensidades de luz e concentrações limitantes de CO_2 , supõem-se que a taxa de fotossíntese coincide com o valor assintótico da curva de resposta da luz (A_m). Então para valores pequenos de C_i , A_m é relacionado linearmente com a concentração C_i de CO_2 de acordo com Goudriaan et al. (1985):

$$A_m = g_m(C_i - \Gamma). \quad (3.79)$$

A equação (3.79) define a condutância do mesófilo (g_m).

Pode-se verificar que a condutância do mesófilo deve ser derivada da taxa de fotossíntese na saturação de luz, além de que, a equação (3.79) quantifica a inclinação

da curva de resposta do CO₂ para alta intensidade de luz.

Assimilação fotossintética

Goudriaan et al. (1985) propõe uma função resposta empírica para combinar as respostas da assimilação fotossintética líquida (A_n), concentração de CO₂ e luz. A assimilação fotossintética líquida (A_n) é limitada pelo déficit de luz de acordo com a equação de saturação aplicada à RFA representada aqui pela variável I_a :

$$A_n = (A_m + R_d) \left[1 - \exp \left(\frac{-\varepsilon I_a}{A_m + R_d} \right) \right] - R_d. \quad (3.80)$$

As equações (3.74) e (3.77–3.80) predizem uma taxa ilimitada de fotossíntese para altas intensidades de luz e altas concentrações de CO₂. Porém, a taxa de fotossíntese será limitada por um valor máximo ($A_{m,max}$) que segundo Stitt (1991) está relacionado com a habilidade real das plantas em alocar os produtos do ciclo de Calvin. Baseado em Thornley et al. (1976), A_m é acessada utilizando uma resposta saturada similar à equação (3.80), isto permite uma transição suave entre a equação (3.79) e $A_{m,max}$, assim sendo, a taxa de fotossíntese em condições de saturação de luz (A_m) fica,

$$A_m = A_{m,max} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-g_m(C_i - \Gamma)}{A_{m,max}} \right] \right\}, \quad (3.81)$$

onde $A_{m,max}$ é a capacidade máxima de fotossíntese, g_m a condutância do mesófilo, Γ é o ponto de compensação e C_i a concentração interna de CO₂.

Resposta Estomática

A concentração interna de CO₂ (C_i) pode ser calculada da seguinte maneira,

$$C_i = fC_s + (1 - f)\Gamma, \quad (3.82)$$

onde C_s é a concentração de CO₂ no ar e f é chamado fator de conexão (sensível à umidade do ar).

Segundo Jacobs (1994), no passado ($C_s - C_i$) era parametrizada tomando-se $C_i/C_s = k$ onde o valor de k era constante e aproximadamente 0,7 para plantas C3. Nesta parametrização A_n e g_s eram correlacionados linearmente, porém para que k

seja constante o estímulo do meio ambiente deve afetar A_n e g_s relativamente da mesma maneira. Goudriaan et al. (1985) e Mott (1988) observaram que a umidade do meio é um fator que deve afetar A_n e g_s diferentemente. Com o aumento de D_s , g_s pode ter seu valor reduzido antes que o valor de A_n seja reduzido, ou mesmo que ambos tenham seus valores reduzidos, a taxa com que g_s diminui pode ser maior do que a taxa com que A_n diminui, o que resulta em um decréscimo na razão (C_i/C_s).

Ambos os efeitos podem ser levados em conta pela equação (3.83) que é utilizada para completar o conjunto de equações do modelo A-gs de Jacobs et al. (1996). A diferença entre as concentrações de CO₂ fora e dentro da folha ($C_s - C_i$) é então parametrizada como função da umidade do ar, e isto é realizado tomando-se a relação entre C_i e C_s como:

$$f \equiv \frac{C_i - \Gamma}{C_s - \Gamma} = f_0 \left(\frac{1 - D_s}{D_{max}} \right). \quad (3.83)$$

A equação (3.83) descreve o efeito da concentração relativa de CO₂ dentro e fora da folha para calcular o valor da concentração de CO₂ dentro da folha na expressão de A_m (eq. 3.81). A equação (3.83) permite também reproduzir a resposta do estômato com relação à umidade, gerando a solução simultânea da A_n e da razão C_i/C_s , permitindo iterações ou soluções analíticas. No entanto os dois parâmetros, D_{max} e f_0 , devem ser prescritos. No presente estudo usou-se $D_{max} = 45 \text{g kg}^{-1}$ e $f_0 = 0,85$, como já justificado anteriormente.

No módulo A-gs descrito neste trabalho, a variável aplicada para caracterizar o efeito da umidade do ar nos estômatos é o déficit de saturação folha-ar (D_s) porque segundo Van Wijk et al. (2000) a umidade relativa do ar não é apropriada para a modelagem da troca gasosa nas folhas,

$$D_s = q_{vsat}(T_s) - q_{va}, \quad (3.84)$$

onde T_s é a temperatura da folha, q_{va} é a umidade específica do ar e $q_{vsat}(T_s)$ é a umidade específica de saturação.

Estresse Hídrico no Solo

O modelo A-gs de Jacobs (1994) não contempla o estresse hídrico no solo, e calcula a assimilação de CO₂ e a condutância estomática potenciais. Se as camadas de

solo na zona de raízes não forem capazes de fornecer água o suficiente para o pleno desenvolvimento da vegetação, a transpiração será reduzida mesmo se os estômatos estiverem abertos por conta de condições atmosféricas favoráveis.

O ISBA-A-gs proposto por Calvet et al. (2004) utiliza um módulo para incluir o estresse hídrico do solo na modelagem A-gs, mudando-se as parametrizações da condutância do mesófilo (g_m),

$$g_m = \xi g_m^*, \quad (3.85)$$

sendo g_m^* a condutância do mesófilo potencial (sem estresse hídrico) e ξ a quantidade de água disponível na zona de raízes que pode ser obtida através de,

$$\xi = \frac{w_2 - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}}. \quad (3.86)$$

Calvet et al. (2004) introduziram um valor limite mínimo para ξ igual a 0,1 no módulo que calcula o estresse hídrico no solo para evitar um comportamento não realista do modelo. Biologicamente a queda dos níveis de umidade do solo na zona de raízes afeta de maneira diferente a condutância estomática de diferentes espécies. Cada espécie possui uma defesa específica ao estresse hídrico como no caso das duas vegetações lenhosas estudadas por Calvet et al. (2004), onde o pinheiro bravo tolerou o secamento do solo, enquanto que o carvalho alvarinho utilizou uma estratégia para evitar o secamento do solo.

3.2.2 Módulo gs

Alternativamente à formulação A-gs para cálculo do fluxo de dióxido de carbono, é possível uma modelagem mais simples, que praticamente não leva em conta aspectos fisiológicos da planta. Neste método a resistência estomática é calculada a partir das equações 3.41 e 3.1 do método proposto por Jarvis (1976). A partir da condutância estomática g_s , calculada pelo ISBA original, a assimilação fotossintética A_n é calculada por

$$A_n = \frac{g_s (C_s - C_i)}{1,6}, \quad (3.87)$$

onde C_i é calculado por (3.83) com parâmetros dados pela tabela (3.4) e respectivas correções dadas por (3.72).

Em resumo, no presente trabalho, a menos de pequenas modificações descritas no presente capítulo, foram implementados o modelo SVAT ISBA em duas versões: ISBA-*gs*, que usa a implementação do ISBA e calcula a assimilação de CO₂ simplificada pelo módulo *gs* de Jarvis (Jarvis, 1976); e ISBA-A-*gs*, que implementa o ISBA com o módulo A-*gs* Jacobs (1994) para assimilação fotossintética. Esta última implementação é feita com e sem os aprimoramentos da dependência da respiração noturna como função da temperatura proposta neste capítulo. Para ambas as implementações foram feitos testes com diferentes implementações da umidade superficial do solo h_u .

Capítulo 4

Aplicações dos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs

Foram implementados códigos computacionais em linguagem FORTRAN95 dos modelos de interação superfície-atmosfera ISBA-gs e ISBA-A-gs apresentados.

Os modelos foram aplicados a duas safras (2001 e 2002) de plantação de soja na Fazenda São Lourenço (referida doravante por SLOU, SLOU2001 e SLOU2002) no oeste do estado do Paraná, e a outra a uma plantação de soja em Campo de Mayo (CMAYO, doravante) nos arredores do município de Buenos Aires na Argentina. O objetivo principal (porém não único) foi o de se calcular a assimilação líquida de CO₂ (A_n).

Para a integração temporal e solução numérica dos modelos foi empregado o método Runge Kutta de quarta ordem (Press et al., 1993) ao sistema de equações diferenciais ordinárias apresentadas no capítulo anterior.

Em SLOU foram utilizados para as condições iniciais dados de medições da temperatura na superfície e no solo, bem como de umidades no solo. Para a umidade retida na vegetação não houve dados de medição. Porém o modelo simulou continuamente toda a safra de soja nos respectivos anos, sendo que foi estudado especificamente o período de pleno desenvolvimento da cultura de soja. Assim sendo, o período de estudo não sofreu influência com relação as condições de inicialização. Em CMAYO não foi simulado todo o período referente a safra de soja por indisponibilidade de dados forçantes contínuos. Porém foram tomadas as devidas precauções assim como em SLOU para que as condições de inicialização não exercessem impac-

tos no período de estudo.

Quando calibrados inicialmente para a safra de 2001, foi verificado que os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs reproduziram bem as observações. Porém quando esta calibração foi usada para a série de dados de 2002, o desempenho do modelo ficou muito aquém do desejado. Houve então a necessidade de uma estratégia de calibração que pudesse fornecer bons resultados para ambas as safras. A seção (4.1.2) resume este trabalho de calibração.

Nas seções (4.2.2) e (4.2.3) utiliza-se os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs calibrados em SLOU na plantação de soja em CMAYO na Argentina. O modelo foi validado através de comparação com observações do fluxo de CO₂ feitas por Posse et al. (2010).

Este capítulo está organizado da seguinte forma. São feitas descrições breves dos experimentos em SLOU e CMAYO. É mostrada a estratégia de calibração em SLOU. Os resultados dos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs são apresentados para SLOU e CMAYO, e é feita uma discussão sobre eles. Ao final são mostrados testes de diferentes implementações para a respiração.

4.1 Aplicações em SLOU, estado do Paraná

Nos experimentos em SLOU, foram medidas séries de dados tanto para forçar quanto para testar os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs. Abaixo é apresentado um resumo do experimento que está detalhado em Vissotto (2003).

4.1.1 Experimento de campo

O experimento micrometeorológico SLOU foi feito no município de Santa Terezi-
nha do Itaipu, no oeste do estado do Paraná com posição geográfica 25°27,929' S
e 54°24,651' O, a uma altitude de 285 m e aproximadamente 10 km de distância do
lago de Itaipu.

Para as medições dos dados forçantes foram utilizados os seguintes equipamentos descritos em Dias et al. (2002): sonda de medição de temperatura com resistência de platina de 1000 Ohms para a temperatura atmosférica (T_a), piranômetro (LICOR LI-200X) para radiação solar incidente e refletida (R_{si} , R_{sr}), sensor capacitivo

(Campbell CS500) para umidade relativa do ar (y_a), anemômetro de hélice (YOUNG 03001) para velocidade do vento (V_a) e pluviômetro para a precipitação (P).

Nesta pesquisa utilizou-se duas séries de dados, sendo a primeira de 15/02/2001 até 22/02/2002 e a segunda de 20/03/2002 até 31/12/2002. As duas séries originais foram convertidas em duas séries menores, SLOU2001 e SLOU2002, que compreendem os períodos de 01/10/2001 até 22/02/2002 e 01/10/2002 até 31/12/2002, que são os períodos referentes ao pleno desenvolvimento das mudas de soja.

As variáveis e os fluxos usados nas comparações com os modelos foram medidas no experimento pelos seguintes equipamentos (Dias et al., 2002): temperatura do solo com três sensores (Campbell 107) nas alturas de 2, 20 e 40 cm; umidade do solo através de três sensores TDR (Campbell CS615L) nas alturas de 2, 20 e 40 cm; radiação incidente e refletida com piranômetro (LICOR LI-200X); radiação líquida utilizando radiômetro líquido (REBS Q7.1); fluxo de calor no solo com duas placas (Campbell HFT3); fluxos de calor sensível e calor latente pelo método de covariâncias turbulentas usando anemômetro de hélice (Young27106) para a velocidade vertical do vento; sensor capacitivo (Campbell CS500) para umidade do ar; termistor de platina para a temperatura média do ar em abrigo a 10 m; termopar (Campbell FWTC3) para as flutuações de temperatura do ar dentro e fora do abrigo.

Para parâmetros do solo foram realizados ensaios laboratoriais visando a determinação das propriedades hidráulicas por Prevedello (2003) e Vissotto (2003). Foram obtidos resultados através de inúmeras amostras deformadas de solo para a determinação da curva de retenção e através de três corpos de prova não deformados com dimensões aproximadas de $40 \times 40 \times 20$ cm de comprimento, largura e profundidade respectivamente. A tabela (4.1) apresenta os coeficientes do ISBA (Noilhan e Planton, 1989) para os tipos de solo sugeridos por Clapp e Hornberger (1978) e os dados dos ensaios laboratoriais em SLOU para comparação.

Os parâmetros IAF e veg foram extraídos de Vissotto (2003) que realizou verificações em campo no sítio experimental de SLOU, para as safras de soja e milho nos anos de 2001 e 2002.

Tipo do Solo	$C_{Gsat}^{(1)}$	C_{1sat}	C_{2ref}	a_{eq}	b	p_{eq}	w_{sat}	w_{fc}	w_{wilt}
Areia	3,222	0,082	3,9	0,387	4,05	4	0,395	0,135	0,068
Areia franca	3,057	0,098	3,7	0,404	4,38	4	0,410	0,150	0,075
Franco arenoso	3,560	0,132	1,8	0,219	4,90	4	0,435	0,195	0,114
Franco siltoso	4,418	0,153	0,8	0,105	5,30	6	0,485	0,255	0,179
Franco	4,111	0,191	0,8	0,148	5,39	6	0,451	0,240	0,155
Franco argilo arenoso	3,670	0,213	0,8	0,135	7,12	6	0,420	0,255	0,175
Franco argilo siltoso	3,593	0,385	0,4	0,127	7,75	8	0,477	0,322	0,218
Franco argiloso	3,995	0,227	0,6	0,084	8,52	10	0,476	0,325	0,250
Argilo arenoso	3,058	0,421	0,3	0,139	10,40	8	0,426	0,310	0,219
Argilo siltoso	3,729	0,375	0,3	0,075	10,40	10	0,482	0,370	0,283
Argila	3,600	0,342	0,3	0,083	11,40	12	0,482	0,367	0,286
SLOU	3,600	0,302	0,42	0,102	8,8	8,58	0,48	0,40	0,2125

⁽¹⁾O coeficiente térmico C_{Gsat} deve ser multiplicado por 10^{-6} .

Tabela 4.1: Coeficientes do ISBA (Noilhan e Planton, 1989) para os tipos de solo de Clapp e Hornberger (1978) e os dados de ensaios laboratoriais do solo de SLOU (Prevedello, 2003; Vissotto, 2003).

Dado medido	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Temperatura do ar	°C	24,22831	35,79800	10,89900
Radiação solar incidente	$W m^{-2}$	222,94243	1167,40002	-0,50338
Radiação solar refletida	$W m^{-2}$	59,72882	355,67999	-4,80060
Velocidade do vento	$m s^{-1}$	3,34583	11,10000	0,00980
Umidade relativa	%	69,18230	100,00000	14,34800
Precipitação	$mm 30min^{-1}$	0,10874	48,40000	0,00000

Tabela 4.2: Resumo dos forçantes medidos no experimento de campo em SLOU entre os dias, 1 de outubro de 2001 e 22 de fevereiro de 2002.

Forçantes meteorológicas em SLOU

As medições a cada meia hora das forçantes meteorológicas usadas na modelagem SLOU estão apresentadas nas figuras (4.1)–(4.12) e resumidas nas tabelas (4.2) e (4.3).

Como principais diferenças meteorológicas observadas entre as safras de 2001 e 2002, nota-se que a primeira esteve sujeita a uma maior radiação incidente média e menores precipitação e umidade relativa.

Dado medido	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Temperatura do ar	°C	24,32366	38,57000	11,07900
Radiação solar incidente	W m^{-2}	181,77533	973,09003	0,56390
Radiação solar refletida	W m^{-2}	41,36551	281,48999	-0,39730
Velocidade do vento	m s^{-1}	3,96283	14,60200	0,00980
Umidade relativa	%	72,98600	100,00000	25,30200
Precipitação	mm 30min^{-1}	0,16831	32,20000	0,00000

Tabela 4.3: Resumo dos forçantes medidos no experimento de campo em SLOU entre os dias, 1 de outubro de 2002 e 31 de dezembro de 2002.

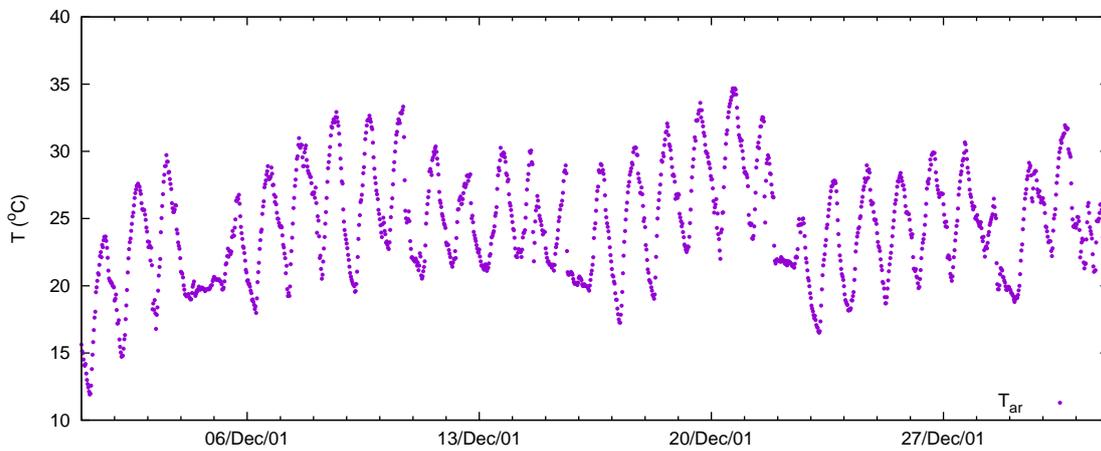


Figura 4.1: Temperatura do ar medida em SLOU (T_{ar}), dezembro de 2001.

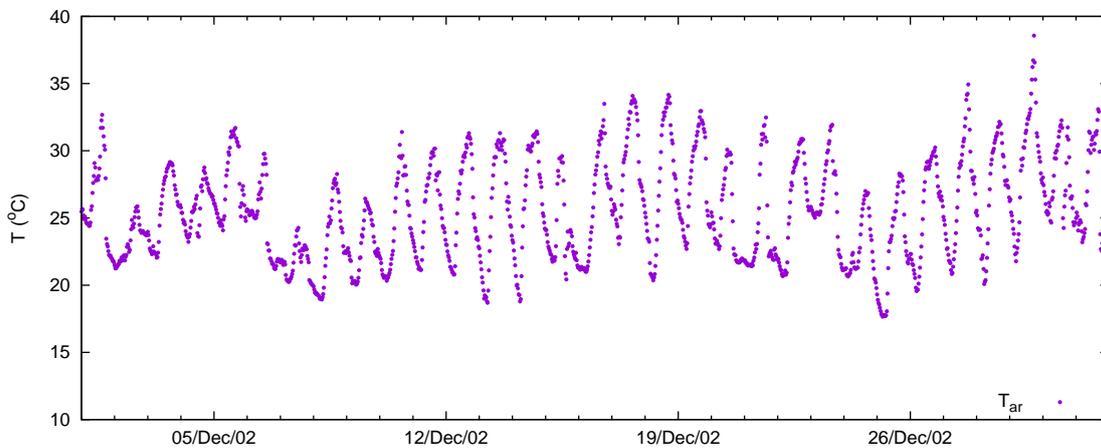


Figura 4.2: Temperatura do ar medida em SLOU (T_{ar}), dezembro de 2002.

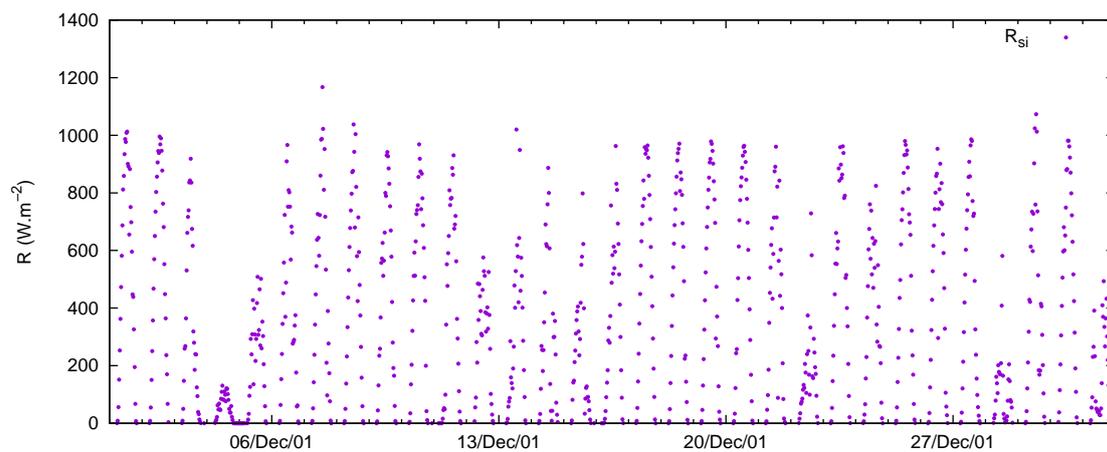


Figura 4.3: Radiação solar incidente medida em SLOU (R_{si}), dezembro de 2001.

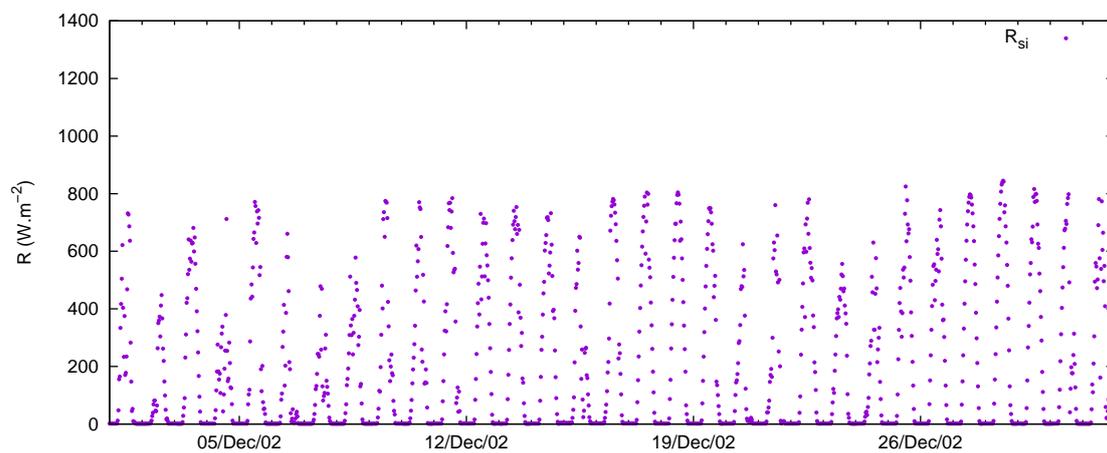


Figura 4.4: Radiação solar incidente medida em SLOU (R_{si}), dezembro de 2002.

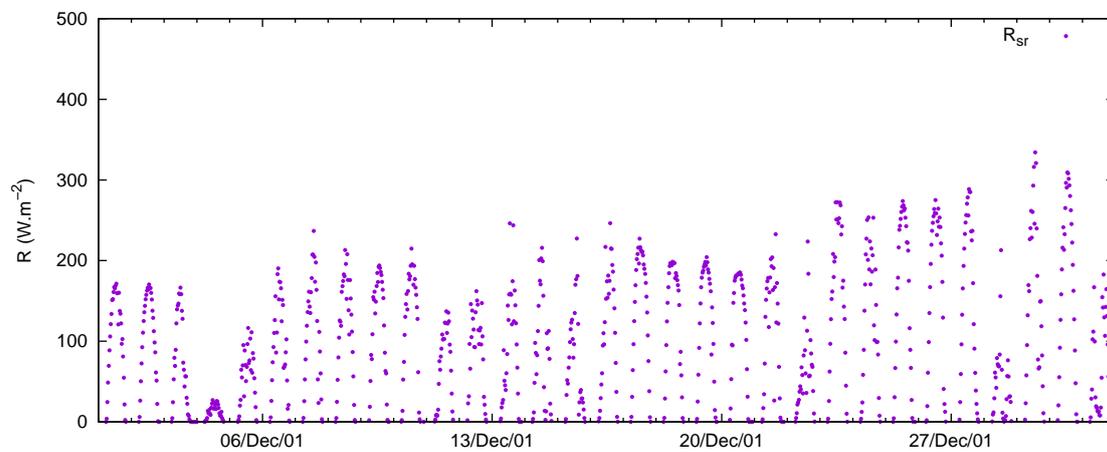


Figura 4.5: Radiação solar refletida medida em SLOU (R_{sr}), dezembro de 2001.

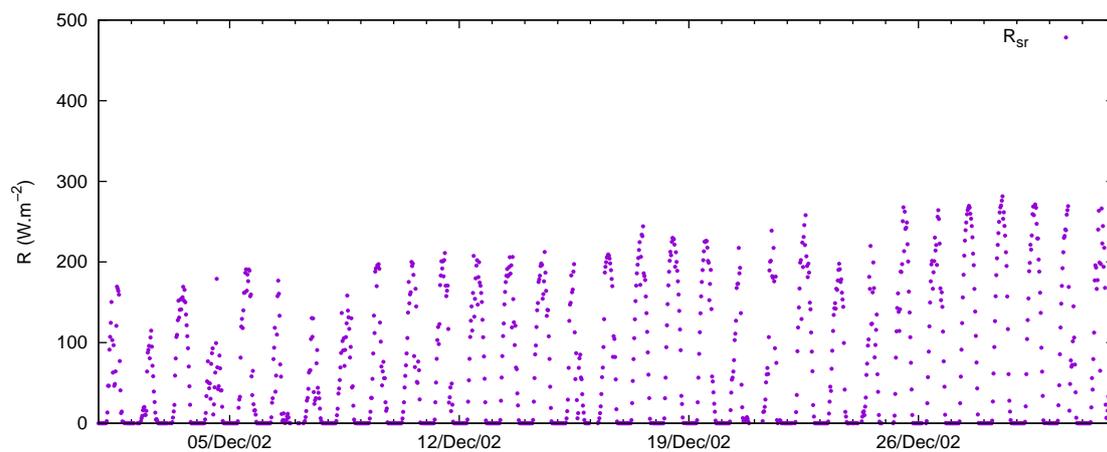


Figura 4.6: Radiação solar refletida medida em SLOU (R_{sr}), dezembro de 2002.

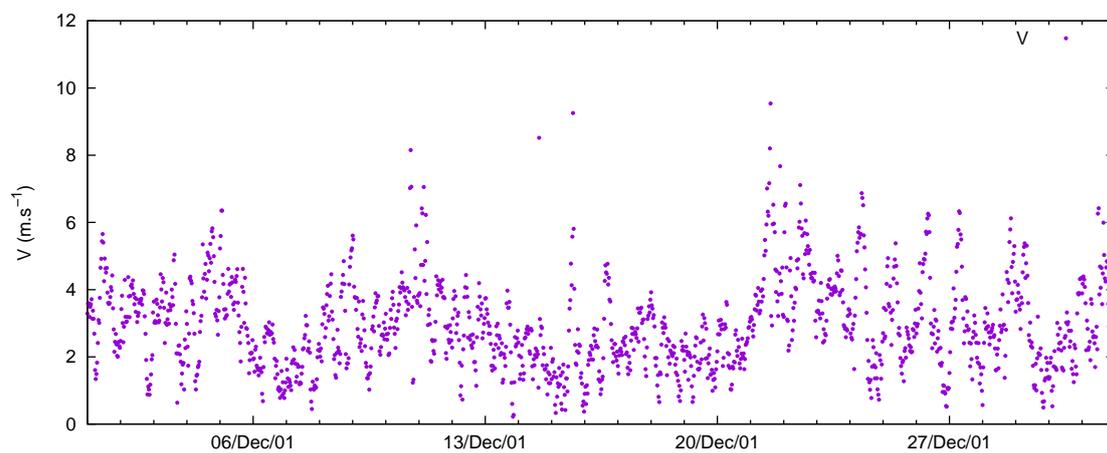


Figura 4.7: Velocidade do vento medida em SLOU (V), dezembro de 2001.

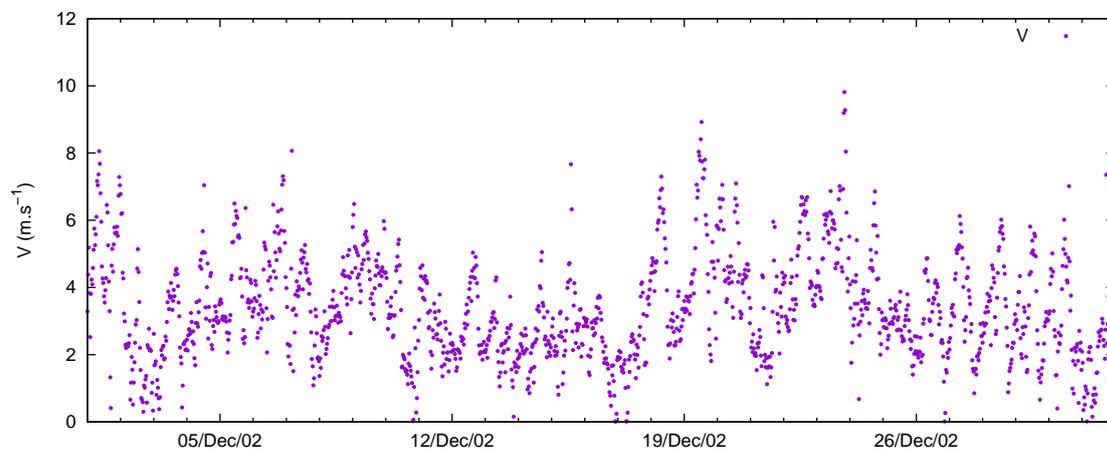


Figura 4.8: Velocidade do vento medida em SLOU (V), dezembro de 2002.

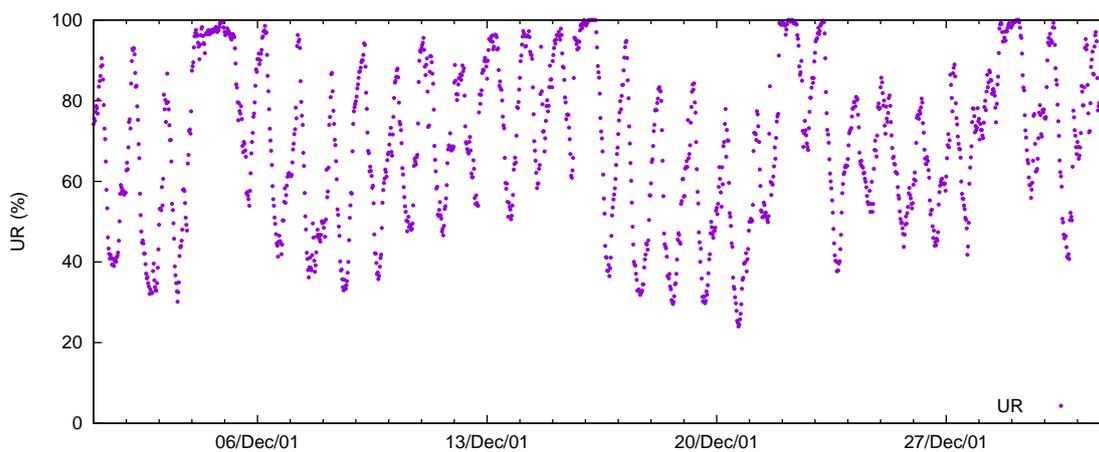


Figura 4.9: Umidade relativa medida em SLOU (UR), dezembro de 2001.

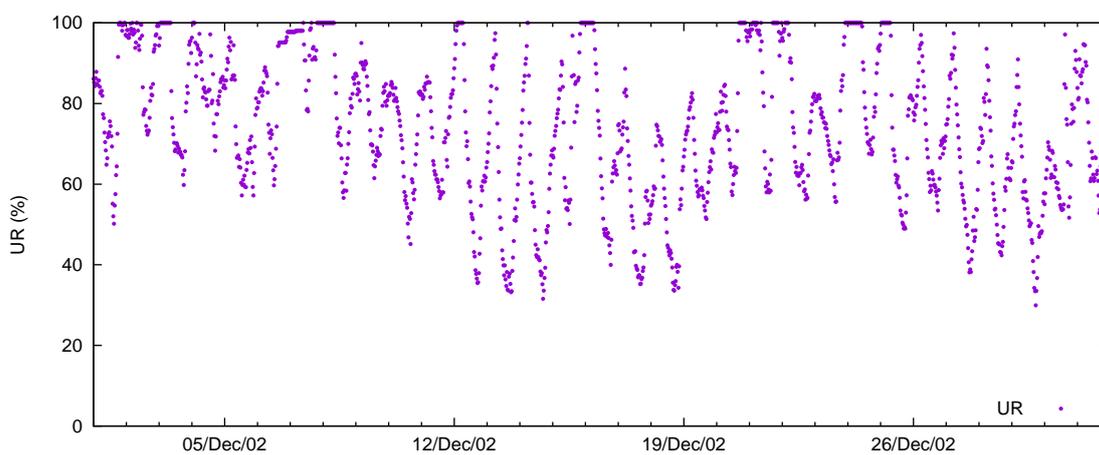


Figura 4.10: Umidade relativa medida em SLOU (UR), dezembro de 2002.

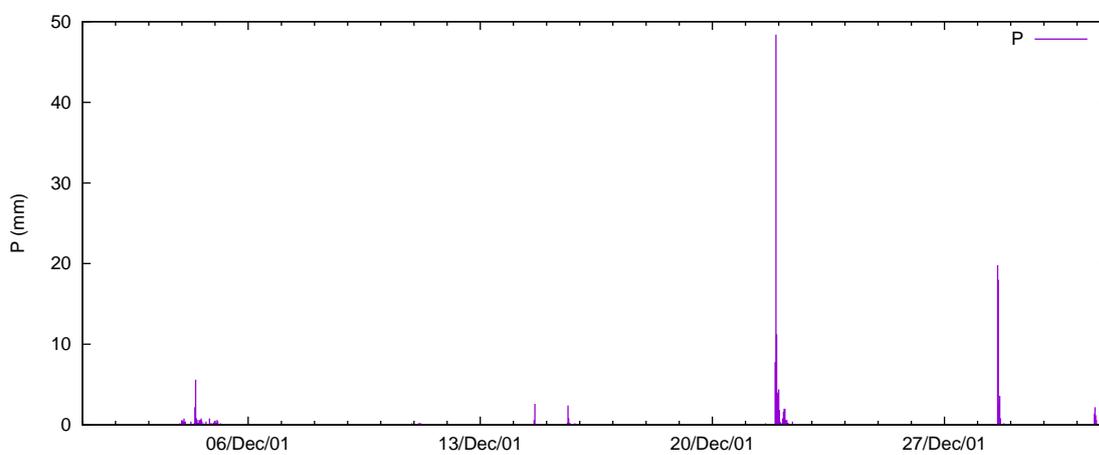


Figura 4.11: Precipitação medida em SLOU (P), dezembro de 2001.

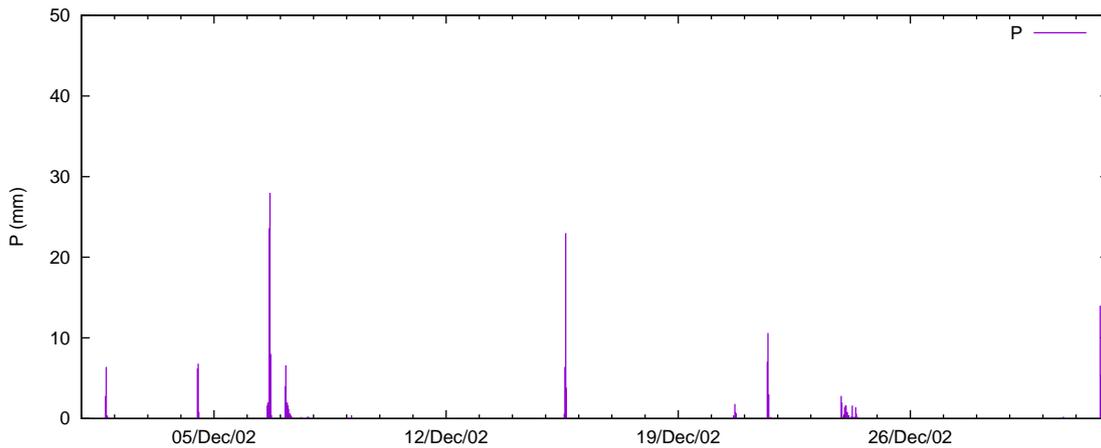


Figura 4.12: Precipitação medida em SLOU (P), dezembro de 2002.

SLOU 2001				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Radiação líquida	W m^{-2}	64,62935	974,91998	-159,03000
Fluxo de calor no solo	W m^{-2}	-3,10135	116,33000	-84,82600
Fluxo de calor sensível	W m^{-2}	34,08777	501,02301	-48,38230
Fluxo de calor latente	W m^{-2}	87,07363	491,73471	-37,70290
SLOU 2002				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Radiação líquida	W m^{-2}	139,42300	743,76160	-99,68600
Fluxo de calor no solo	W m^{-2}	2,39746	94,82700	-128,89000
Fluxo de calor sensível	W m^{-2}	28,34399	460,29535	-46,69821
Fluxo de calor latente	W m^{-2}	71,00112	464,21146	-38,14629

Tabela 4.4: Resumo dos fluxos de calor e radiação líquida, medidos em SLOU nos experimentos de campo em dezembro de 2001 e 2002.

Fluxos de calor e radiação líquida

As medições de fluxos de calor no solo, e fluxos de calor latente e sensível entre o solo e a atmosfera, além da radiação líquida, não são usadas como forçantes, e sim usadas para calibrar e testar os modelos, que preveem estas quantidades. O resumo destes dados está mostrado na tabela (4.4), enquanto que as séries temporais serão mostradas oportunamente junto com os resultados simulados nas fases de calibração/validação.

Cenário	Unidade	d_2	d_3
1	m	1,20	3,00
2	m	1,20	2,50
3	m	1,20	1,60
4	m	1,00	1,60
5	m	0,85	2,50
6	m	0,85	1,60
7	m	0,50	2,50
8	m	0,50	1,60

Tabela 4.5: Cenários testados para as alturas das camadas de solo nos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs em SLOU.

4.1.2 Calibração

As duas séries de dados meteorológicos SLOU2001 e SLOU2002 possuem características meteorológicas diferentes. Portanto, buscou-se calibrar os modelos de maneira que respondam razoavelmente bem aos dois cenários sem que haja necessidade de recalibração para uma situação específica.

Uma análise de sensibilidade foi necessária para se testar vários parâmetros, dentre estes: umidade do solo saturado (w_{sat}), capacidade de umidade do solo (w_{fc}), umidade do solo no ponto de murchamento (w_{wilt}), altura da camada superficial de solo (d_1), altura da camada de solo da zona de raízes (d_2), altura da camada de solo abaixo da zona de raízes (d_3), altura média da vegetação (d_r), concentração de CO_2 do meio (C_s), ponto de compensação a $25^{circ}C$, capacidade máxima de fotossíntese a $25^{circ}C$, condutância do mesófilo a $25^{circ}C$, máximo déficit de saturação folha para o ar (D_{max}), fator de conexão para $D_s = 0$ (f_0) e máxima eficiência da conversão de luz (ϕ).

Dentro de uma faixa de valores aceitáveis que representem situações reais, tomando-se como base valores expostos em referências bibliográficas, verificou-se que as espessuras (alturas d_2 e d_3) das camadas de solo, que caracterizam as zonas de raízes e sub-raízes, são os parâmetros mais impactantes nos resultados.

Na tabela (4.5) são mostrados alguns dos vários cenários testados nesta pesquisa com relação às alturas (d_2 e d_3) das camadas do solo nos modelos.

Para análise estatística e comparação entre os fluxos prognósticos e medidos foi considerado o mês de dezembro, por este ser o período de pleno desenvolvimento da soja em SLOU e conseqüentemente o mais importante com relação ao fluxo de CO_2

que é o foco do trabalho.

Utilizou-se a raiz quadrada do erro quadrático médio para se avaliar a acurácia na previsão do fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo e radiação líquida. Analisou-se a acurácia na previsão individual de cada uma destas quatro variáveis.

Para se analisar e comparar os diversos cenários em SLOU2001 e SLOU2002, e definir no contexto geral da modelagem qual a melhor calibração para os dois anos, calculou-se a média das raízes quadradas dos erros quadráticos médios das quatro variáveis em estudo (fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo e radiação líquida) para 2001 e 2002, sendo posteriormente calculada a média entre os resultados dos dois anos.

Índices de erros

A quantificação da acurácia dos resultados dos modelos quando comparados aos dados, para fins de calibração, foi feita através dos índices de erros apresentados a seguir.

O erro instantâneo de previsão é

$$e_t = P_t - M_t, \quad (4.1)$$

onde e_t é o erro em t , M_t é o valor medido e P_t o valor calculado pelo modelo.

O erro médio (EM) é calculado pela soma dos erros instantâneos dividida pela quantidade de instâncias,

$$EM = \frac{\sum_{t=1}^n e_t}{n}, \quad (4.2)$$

onde n é o número de instâncias. O numerador da equação é a soma dos erros de previsão. Quanto mais próximas forem as somas dos erros positivos e erros negativos, mais imparcial será o modelo, isto acontece quando o valor do EM for próximo de zero.

O desvio médio absoluto (DMA) é uma das medidas mais comuns de erro. O DMA não leva em conta se um erro foi superestimado ou subestimado, caracterizando-se por ser a média do valor absoluto dos erros denominada também de erro médio

absoluto,

$$DMA = \frac{\sum_{t=1}^n |e_t|}{n}, \quad (4.3)$$

onde utiliza-se portanto o valor absoluto ignorando-se a direção do desvio.

O erro quadrático médio (EQM) também pode ser usado como uma medida do erro e é determinado somando-se os erros de cada instante ao quadrado, e dividindo pelo número de pontos,

$$EQM = \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n}, \quad (4.4)$$

A raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$) tem a mesma dimensão da variável em estudo.

Calibração ISBA-gs

Para quantificar a acurácia dos fluxos calculados pelo modelo ISBA-gs em relação aos valores medidos em cada cenário da tabela 4.5, foram calculados: o erro médio (EM), erro quadrático médio (EQM), desvio quadrático médio absoluto ($DQMA$) e raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$). No apêndice (A.1) são apresentados em detalhes os valores das análises estatísticas realizadas com os dados dos anos de 2001 e 2002 para os fluxos de calor latente e sensível, fluxo de calor no solo e radiação líquida.

Verificou-se que dos cenários testados para a composição das camadas de solo, o que produziu melhores resultados para o ano de 2001, foi o quinto ($d_2 = 0,85$ m e $d_3 = 2,5$ m) com $REQM = 77,4455$, enquanto que para o ano de 2002 foi o sétimo ($d_2 = 0,50$ m e $d_3 = 2,5$ m) com $REQM = 70,0842$.

Levando em consideração os dois anos e as quatro variáveis analisadas, o sétimo cenário foi o que obteve o menor erro ($REQM = 74,0853$) seguido pelo quinto cenário ($REQM = 74,4527$), porém quando analisada cada variável independentemente percebe-se que o sétimo cenário responde bem para algumas variáveis e mal para outras. A saber, para 2001 o modelo produziu erros menores para o fluxo de calor latente (LE) e radiação líquida (R_n) e erros maiores para fluxo de calor no solo (G) e fluxo de calor sensível (H); enquanto que para o ano de 2002 foram os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) os melhores resultados enquanto que o fluxo de calor no solo (G) e a radiação líquida (R_n) tiveram maiores erros.

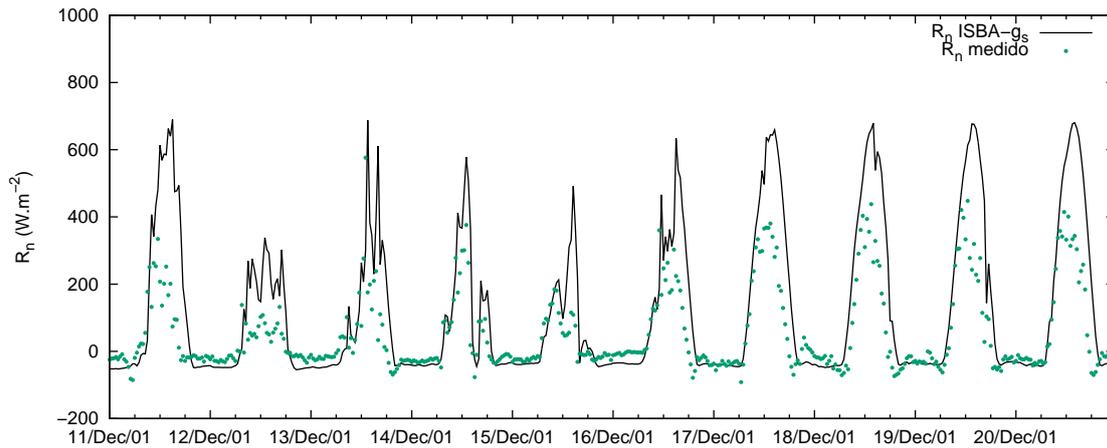


Figura 4.13: Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2001.

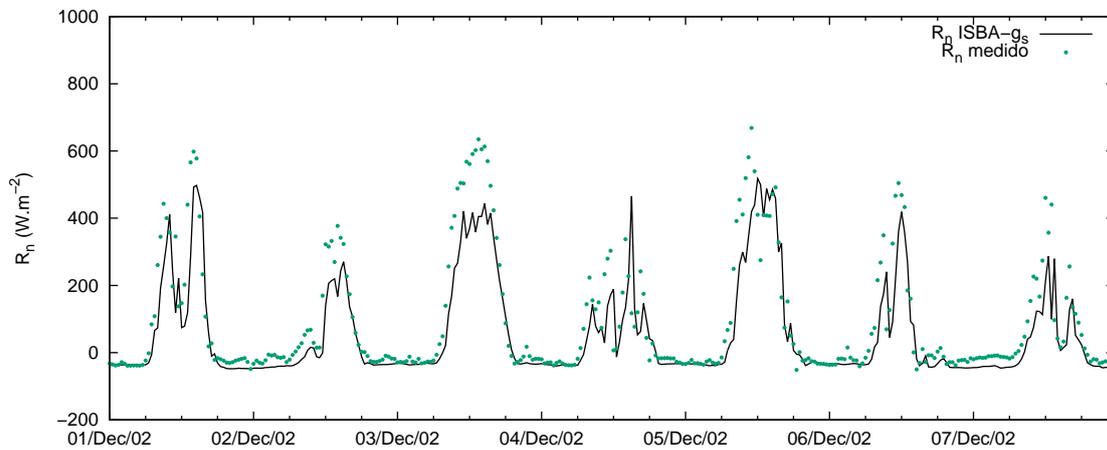


Figura 4.14: Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2002.

O quinto cenário apresentou resultados razoáveis para todas as variáveis estudadas nos dois anos. Por este motivo, optou-se por adotar a configuração para o modelo ISBA-gs com os valores referentes ao quinto cenário ($d_2 = 0,85$ m e $d_3 = 2,5$ m). As figuras (4.13)–(4.20) mostram, os fluxos de calor no solo, calor sensível e latente, e radiação líquida, calculados pelo modelo calibrado ISBA-gs para 2001 e 2002, juntamente com as observações medidas.

Nas figuras (4.21)–(4.32) são mostradas as variáveis prognósticas principais calculadas com o modelo calibrado ISBA-gs, e observadas experimentalmente nos anos de 2001 e 2002: temperatura na superfície (T_s), temperatura na camada da zona de raízes (T_2), umidade média na camada superficial (w_g), umidade média na camada da zona de raízes (w_2), umidade média na camada abaixo da zona de raízes (w_3) e

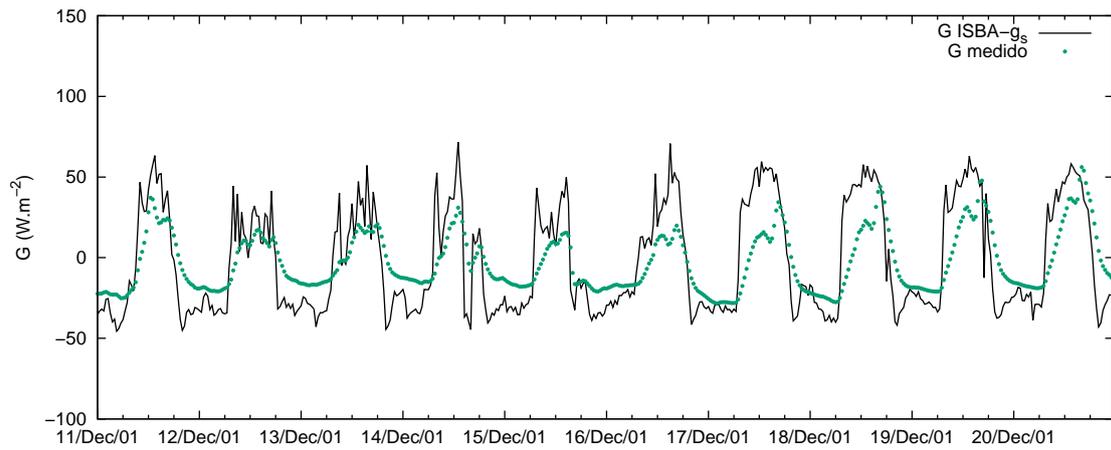


Figura 4.15: Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2001.

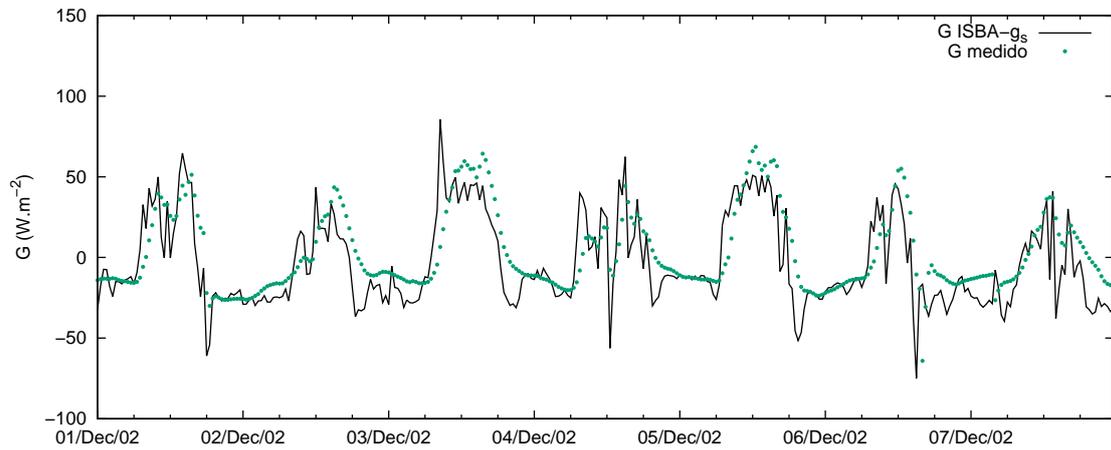


Figura 4.16: Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2002.

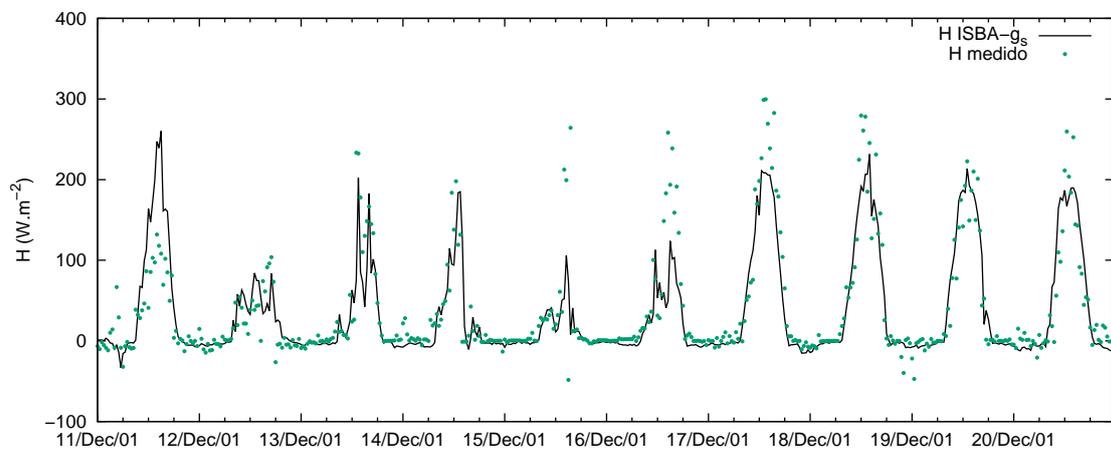


Figura 4.17: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2001.

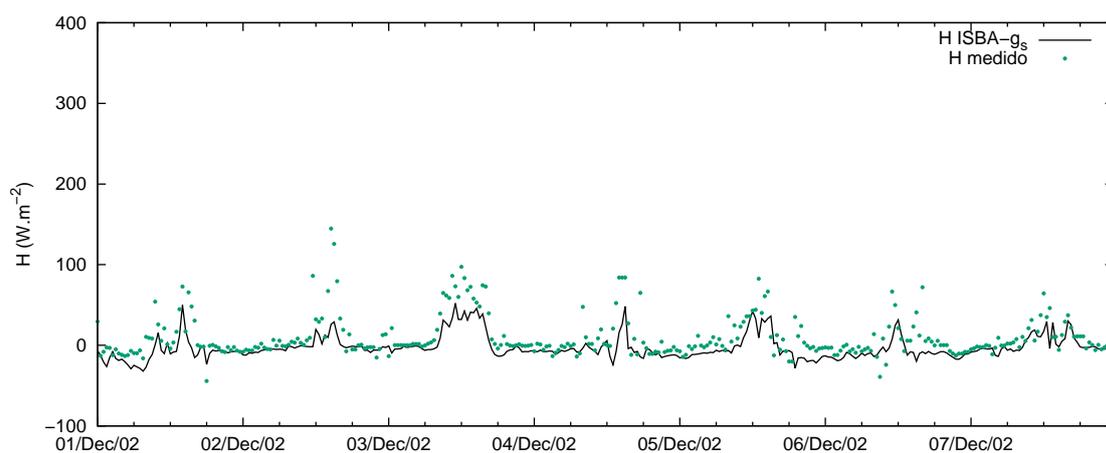


Figura 4.18: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2002.

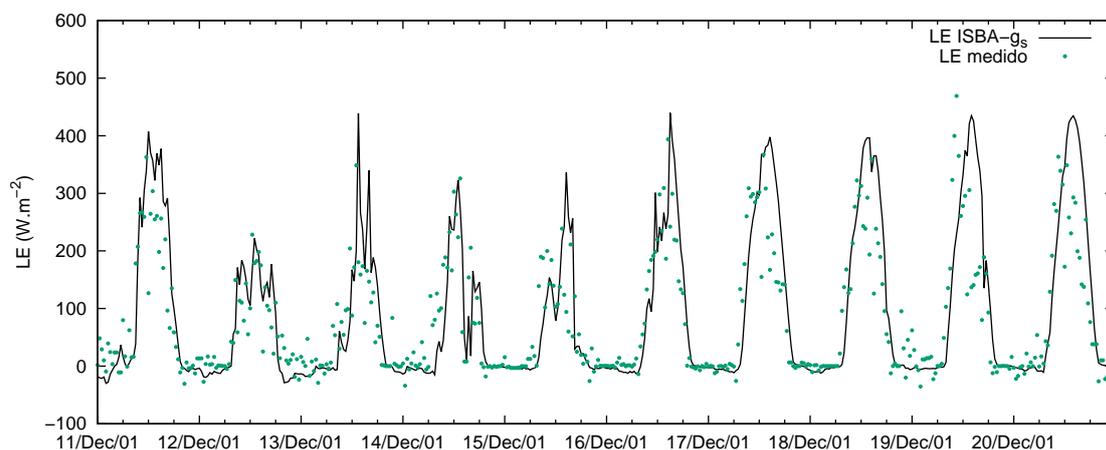


Figura 4.19: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2001.

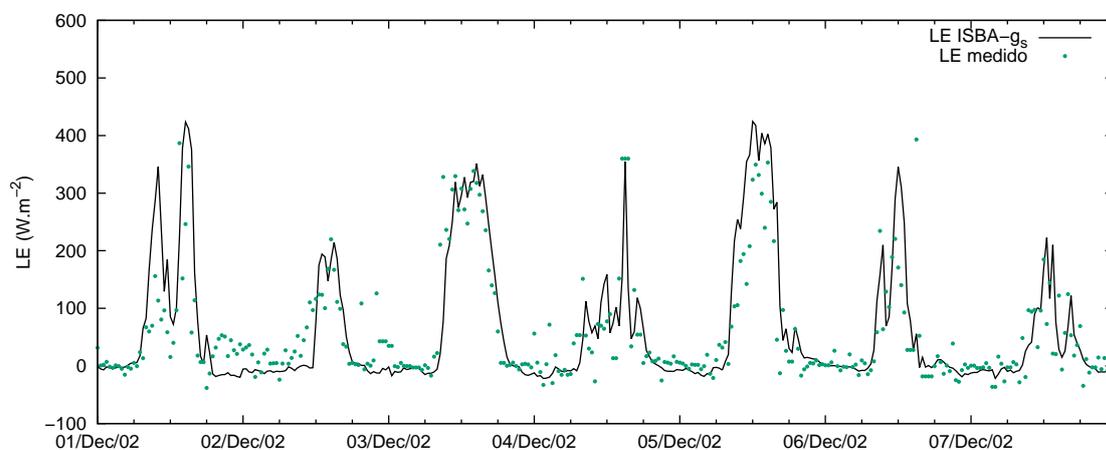


Figura 4.20: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2002.

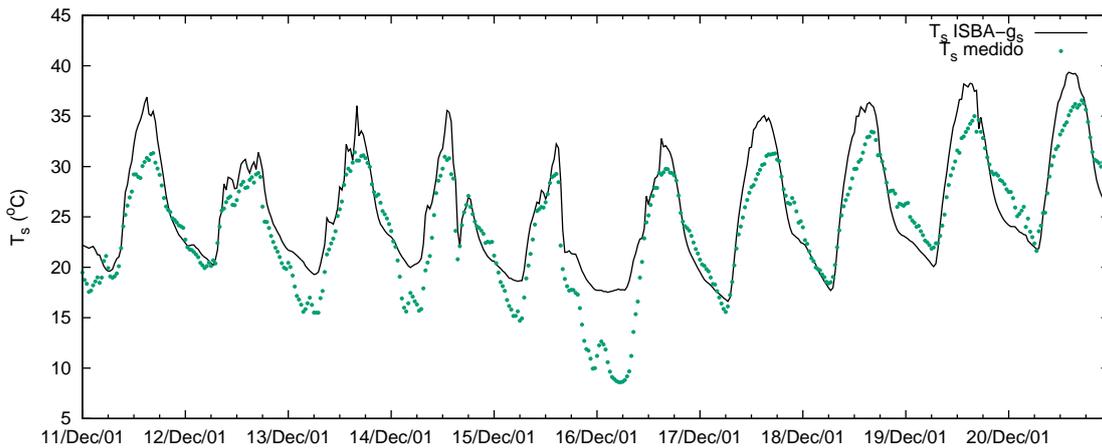


Figura 4.21: Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2001.

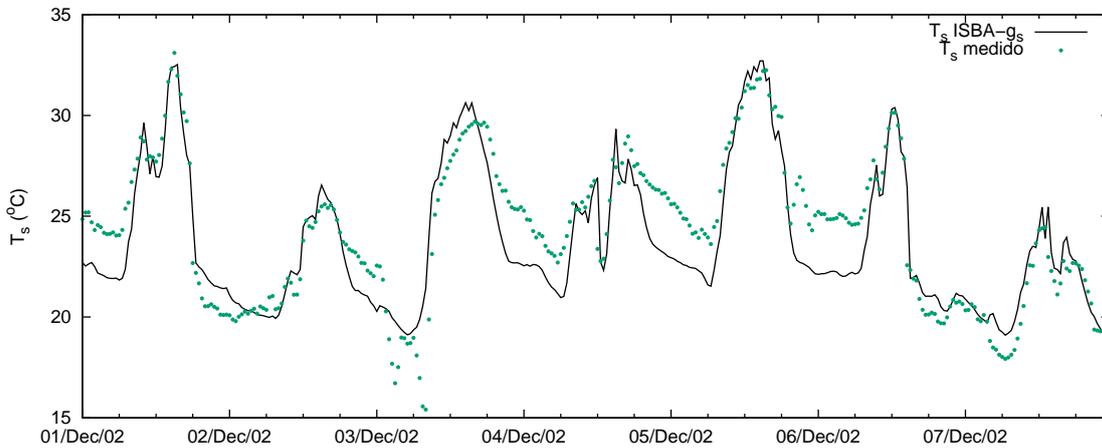


Figura 4.22: Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2002.

umidade média retida sobre a vegetação (w_r).

Nas figuras (4.33)–(4.37) são mostrados o fluxo de calor latente do solo (LE_g), fluxo de calor latente da transpiração (LE_{tr}), fluxo de calor latente direto da vegetação (LE_r), condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 , calculados pelo modelo calibrado ISBA-gs em SLOU para os anos de 2001 e 2002. Para estes resultados não houve medições. Estes resultados estão resumidos na tabela (4.6). Não houve em SLOU medições de fluxo de CO_2 , e o particionamento do LE não é possível de ser feito experimentalmente.

Nas figuras (4.37) e (4.38), e na tabela (4.6), nota-se uma deficiência do modelo ISBA-gs advinda da modelagem do tipo Jarvis da condutância no estômato, que é o fato da mesma não contemplar a respiração celular realizada pela vegetação no

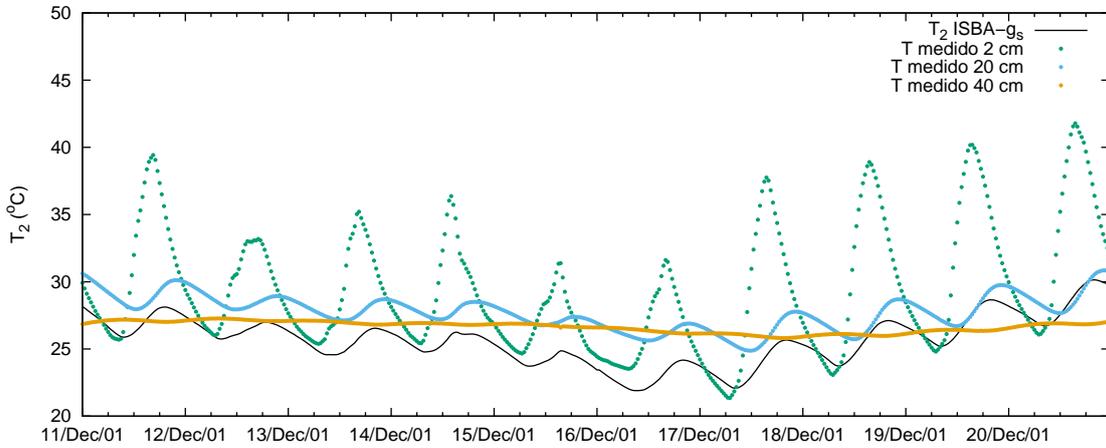


Figura 4.23: Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.

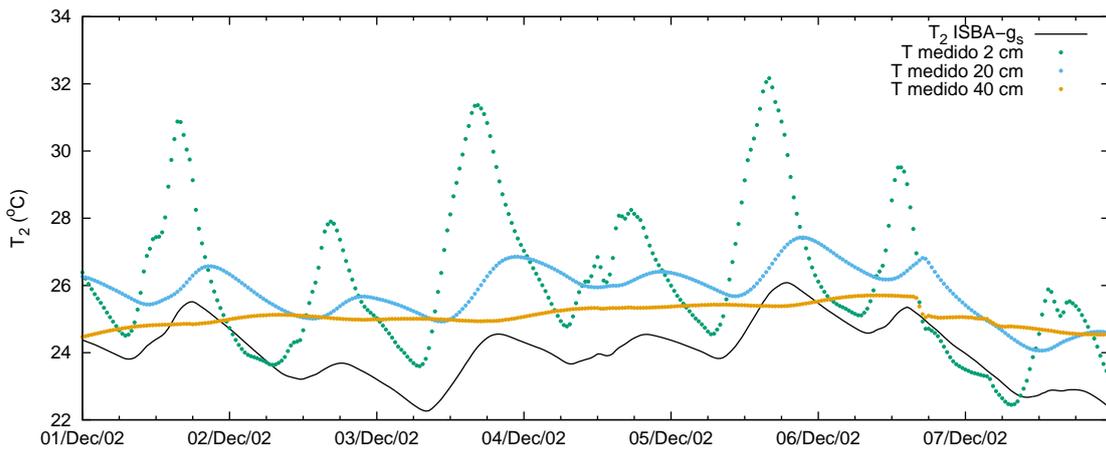


Figura 4.24: Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.

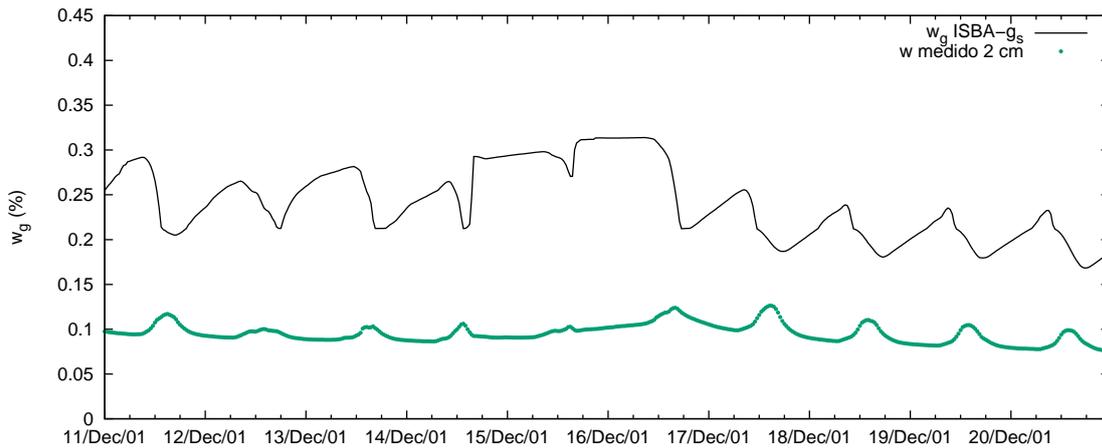


Figura 4.25: Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2001.

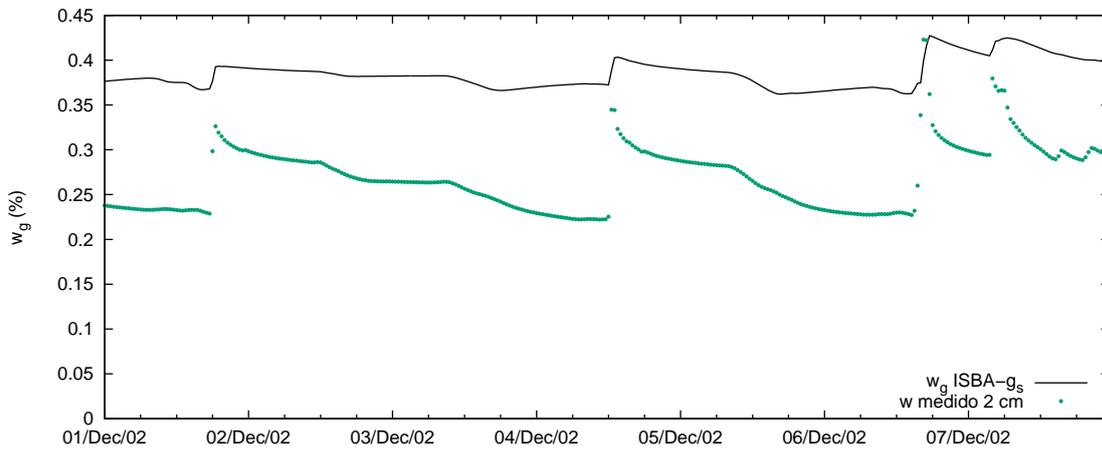


Figura 4.26: Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2002.

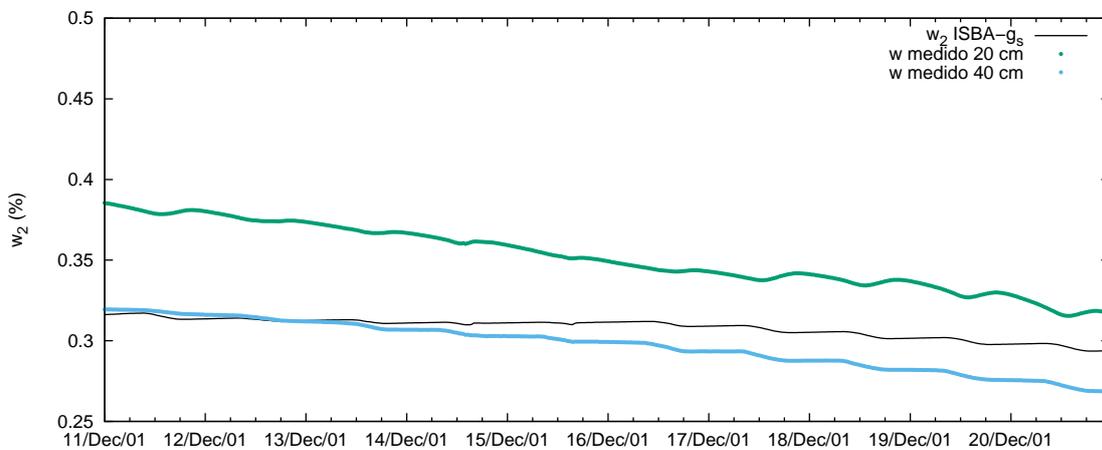


Figura 4.27: Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.

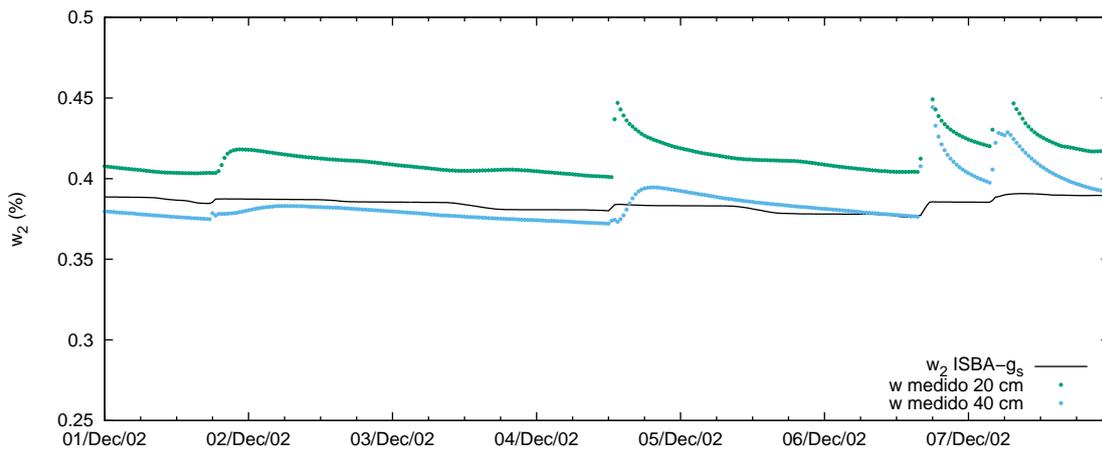


Figura 4.28: Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.

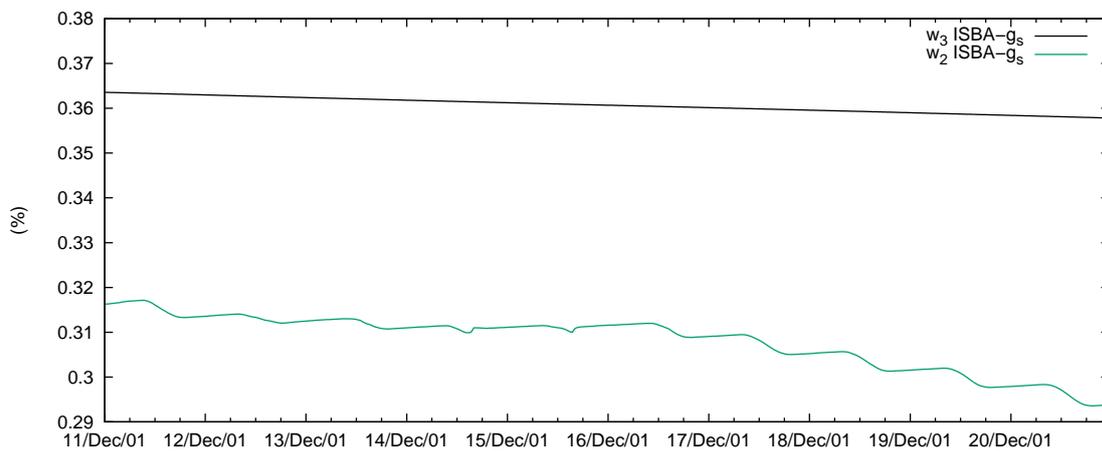


Figura 4.29: Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.

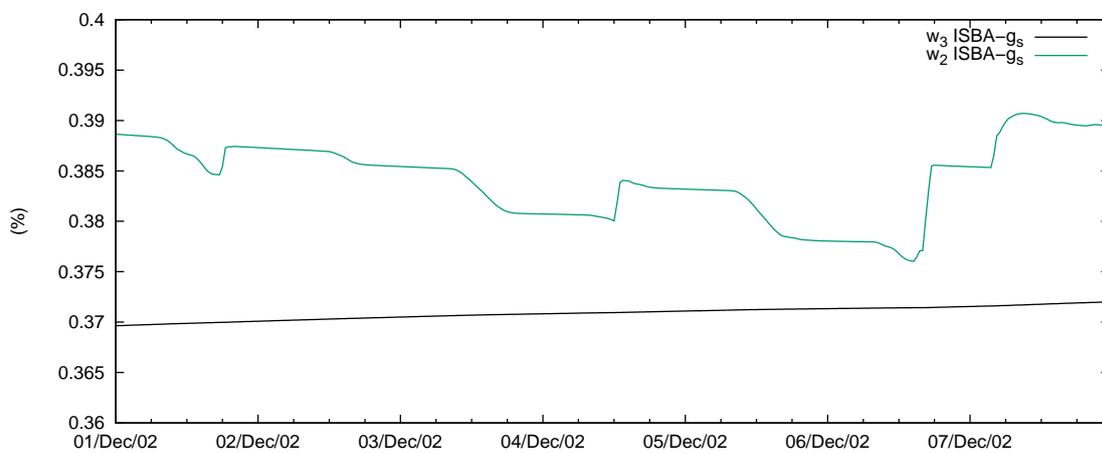


Figura 4.30: Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.

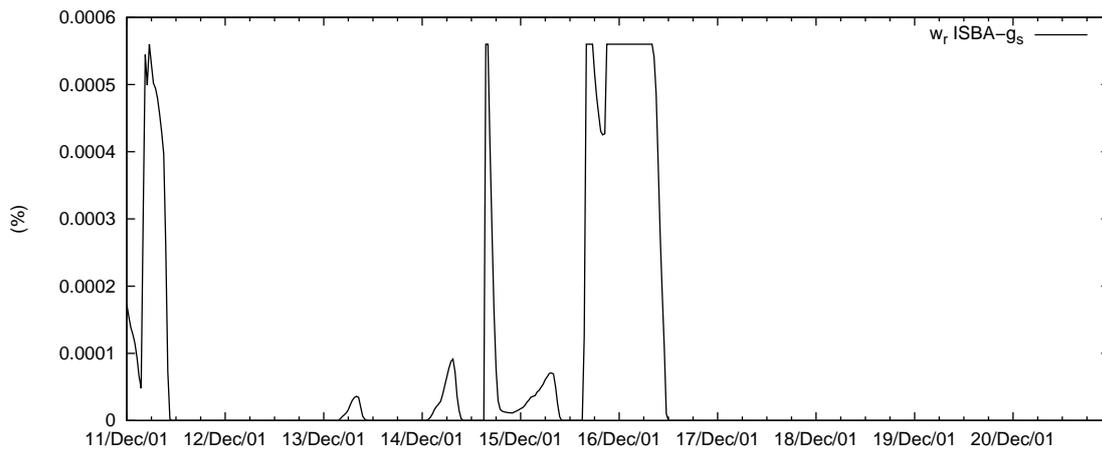


Figura 4.31: Umidade estimada na vegetação (w_r) pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.

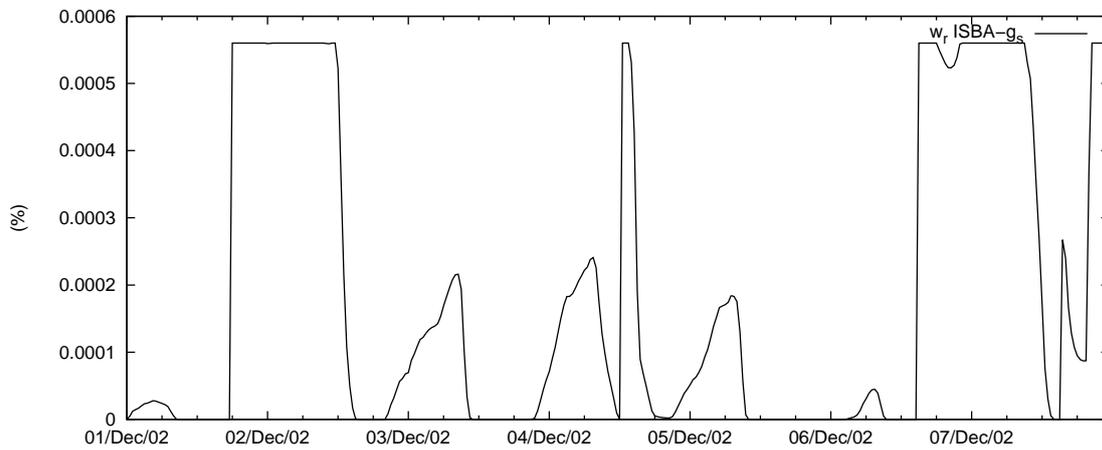


Figura 4.32: Umidade retida na vegetação (w_r) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.

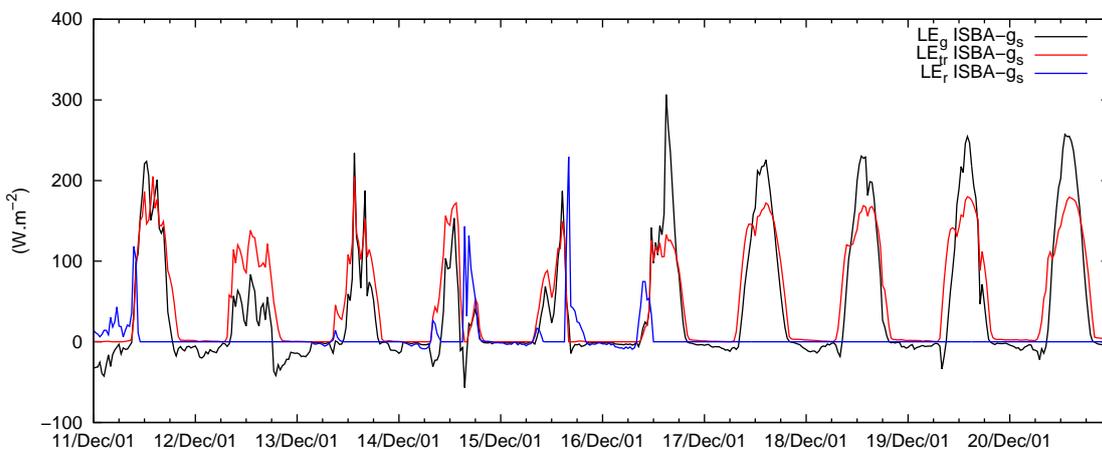


Figura 4.33: Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r), estimados pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.

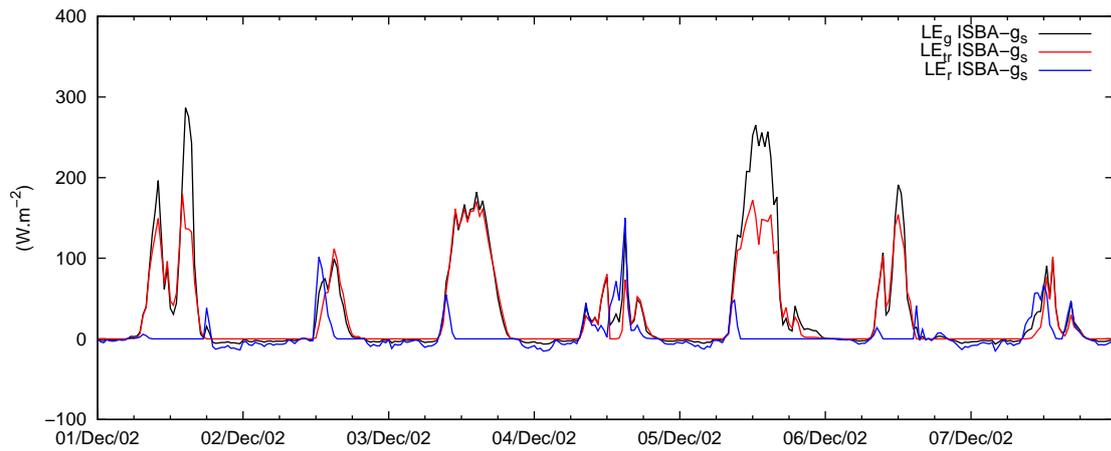


Figura 4.34: Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r), estimados pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.

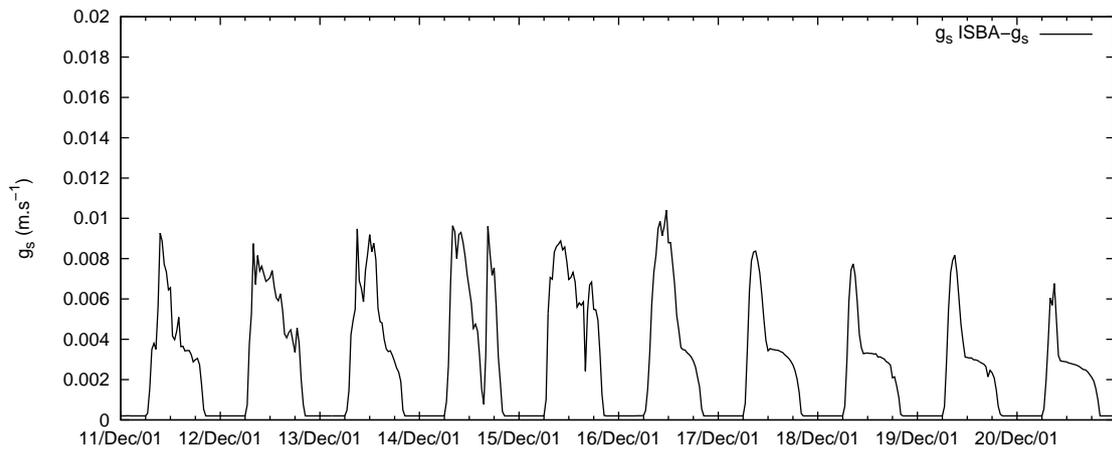


Figura 4.35: Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.

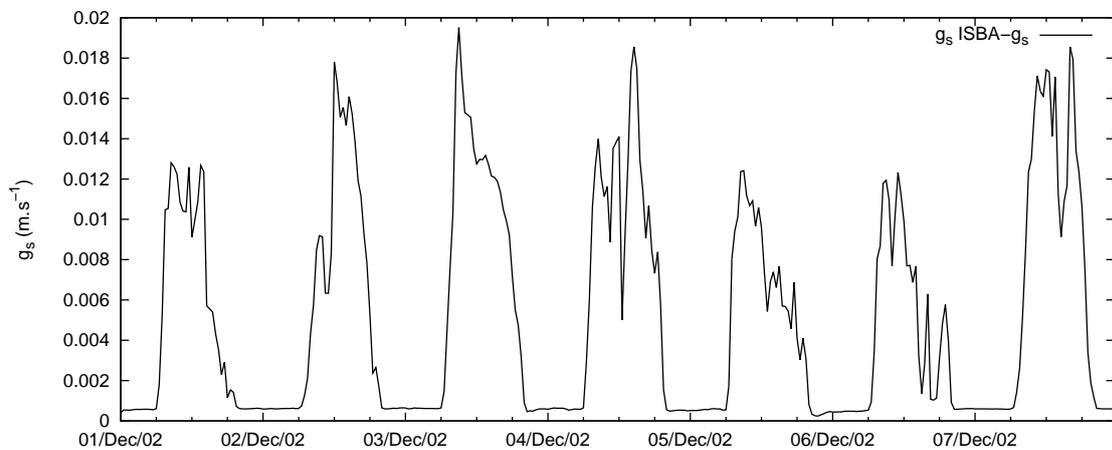


Figura 4.36: Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.

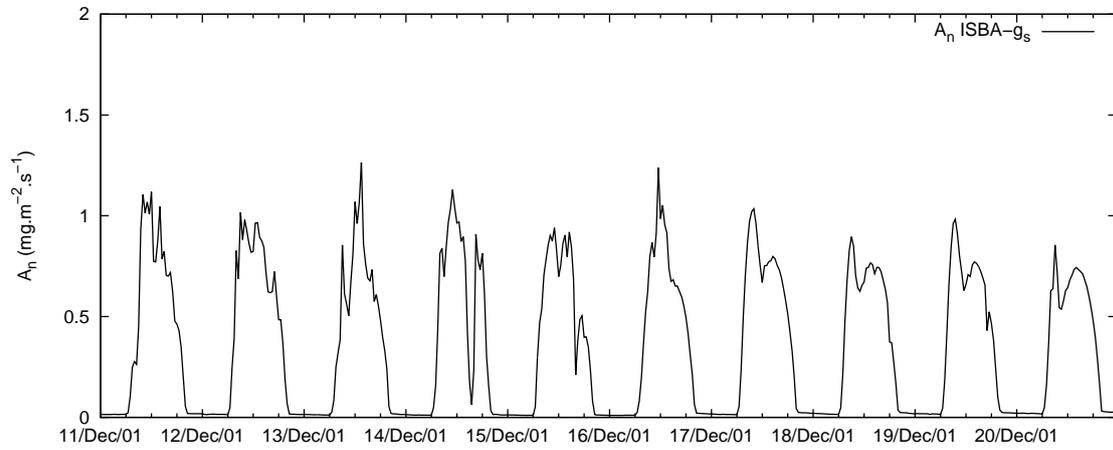


Figura 4.37: Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2001.

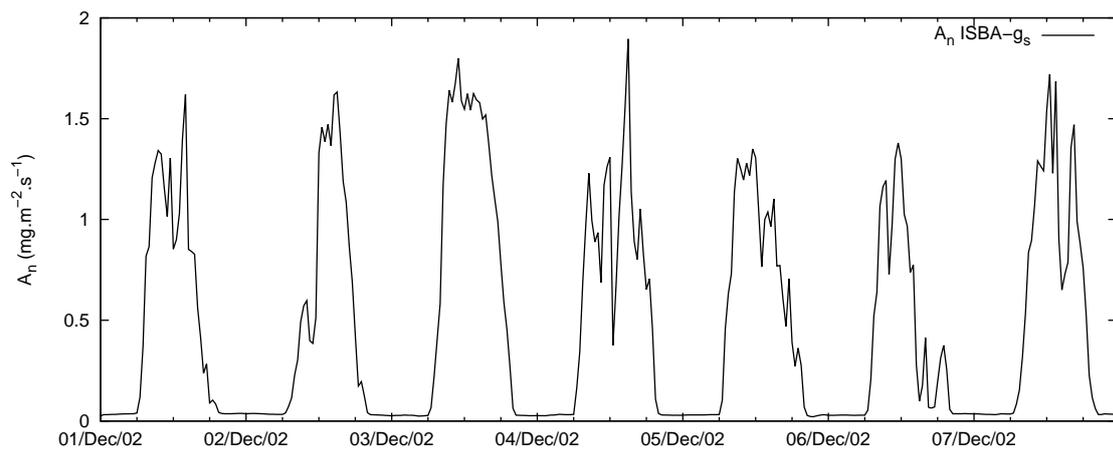


Figura 4.38: Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-gs em SLOU, dezembro de 2002.

ISBA-gs SLOU 2001				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
LE da evaporação no solo	$W m^{-2}$	39,0317	363,0578	-56,8708
LE da transpiração	$W m^{-2}$	48,7827	245,5055	0,0000
LE da evaporação direta na vegetação	$W m^{-2}$	2,4620	229,6307	-19,2559
Condutância estomática	$m s^{-1}$	0,00295	0,01199	0,00020
Assimilação líquida de CO_2	$mg m^{-2} s^{-1}$	0,37581	1,55628	0,00843
ISBA-gs SLOU 2002				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
LE da evaporação no solo	$W m^{-2}$	43,6120	286,6533	-70,4256
LE da transpiração	$W m^{-2}$	39,7488	190,1698	0,0000
LE da evaporação direta na vegetação	$W m^{-2}$	2,6614	419,3042	-15,9635
Condutância estomática	$m s^{-1}$	0,00418	0,01951	0,00020
Assimilação líquida de CO_2	$mg m^{-2} s^{-1}$	0,44939	2,00983	0,01810

Tabela 4.6: Análises do partionamento do fluxo de calor latente em provenientes de evaporação no solo (LE_g), transpiração (LE_{tr}) e evaporação direta na vegetação (LE_r). Condutância estomática de vapor de água (g_s) e a assimilação líquida de CO_2 (A_n). Valores calculados em SLOU com o modelo ISBA-gs em dezembro de 2001 e 2002.

período noturno.

Calibração ISBA-A-gs

Analogamente ao ISBA-gs, aplicou-se o modelo ISBA-A-gs e estimou-se os mesmos índices de erros para SLOU. No apêndice (A.2) são apresentados os resultados em detalhes.

Verificou-se que dos cenários testados, o que produziu melhores resultados de fluxos para o ano de 2001 foi o segundo cenário ($d_2 = 1,20$ m e $d_3 = 2,5$ m) com $REQM = 76,8164$, enquanto que para o ano de 2002 foi o sétimo cenário ($d_2 = 0,50$ m e $d_3 = 2,5$ m) com $REQM = 70,4152$.

Levando em consideração os dois anos e as quatro variáveis analisadas, o segundo cenário ($REQM = 73,7335$) foi o que obteve a menor média de erro seguido pelo terceiro ($REQM = 73,8334$) e quarto ($REQM = 74,2735$) cenários, respectivamente em ordem de menor para maior erro. Porém quando analisada cada variável independentemente, percebe-se que em 2001 o segundo e o terceiro cenários reproduziram bem o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE), e pior a radiação líquida (R_n) e fluxo de calor no solo (G). Para o ano de 2002 o desempenho

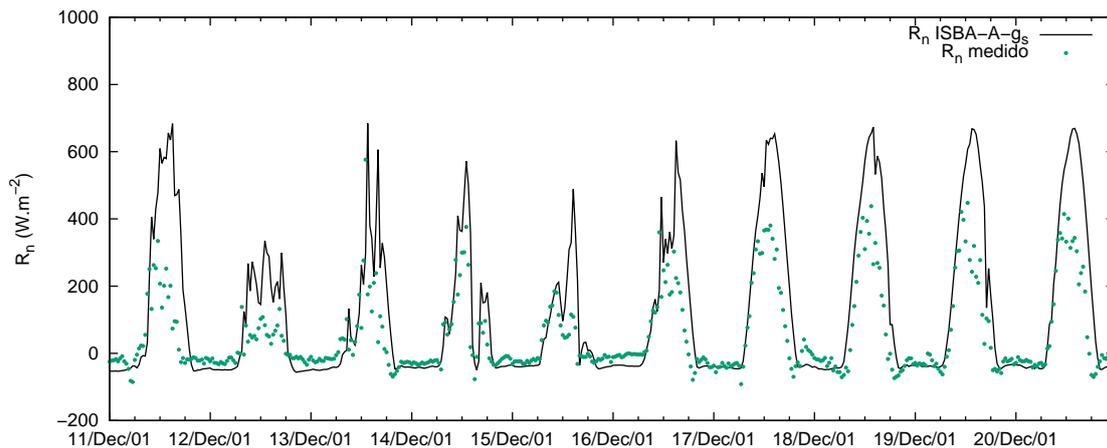


Figura 4.39: Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2001.

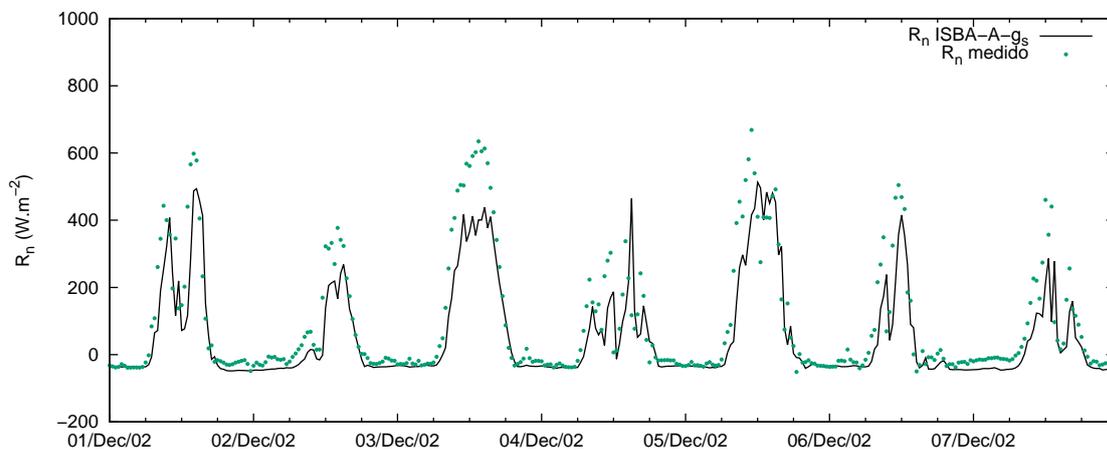


Figura 4.40: Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs e radiação líquida medida em SLOU, dezembro de 2002.

do modelo se inverteu.

O quarto cenário ($d_2 = 1,0$ m e $d_3 = 1,6$ m), foi escolhido para o ISBA-A-gs por apresentar resultados bons e consistentes para todas as quatro variáveis em estudo para ambos os anos. O resultados deste cenário estão apresentados nas figuras (4.39)–(4.46) para o fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e radiação líquida (R_n), juntamente com os fluxos observados experimentalmente.

As figuras (4.47)–(4.58) mostram as seguintes variáveis medidas e calculadas com o modelo calibrado ISBA-A-gs nos anos de 2001 e 2002: temperatura na superfície (T_s), temperatura na camada da zona de raízes (T_2), umidade média na camada superficial (w_g), umidade média na camada da zona de raízes (w_2), umidade média

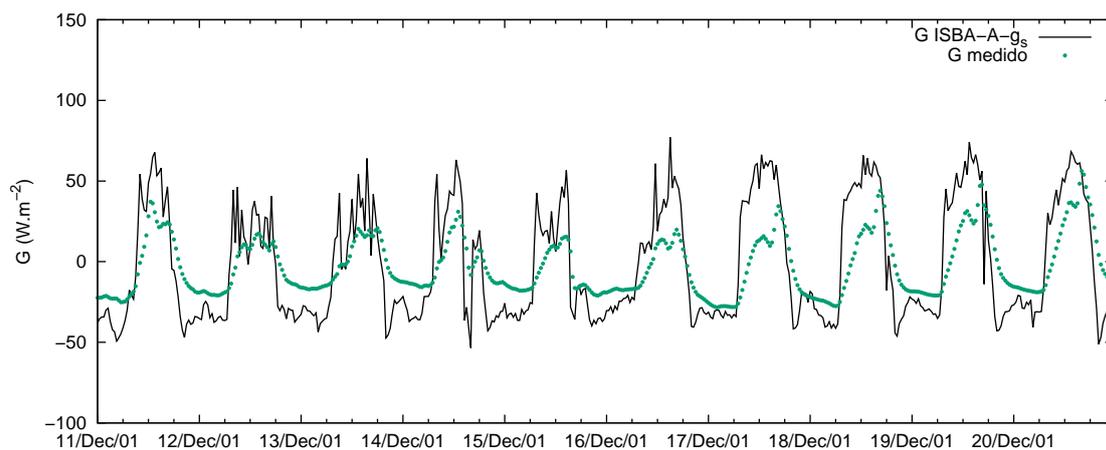


Figura 4.41: Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2001.

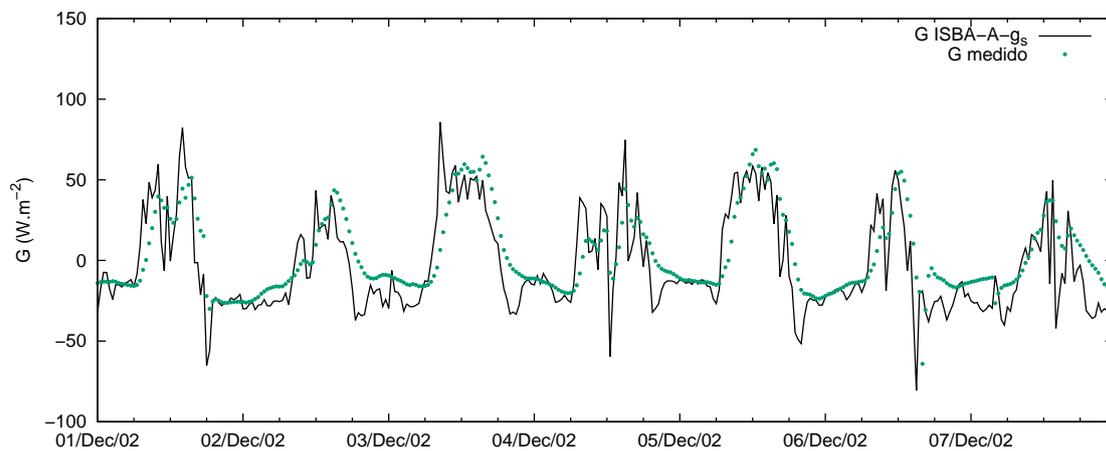


Figura 4.42: Fluxo de calor no solo (G) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor no solo medido em SLOU, dezembro de 2002.

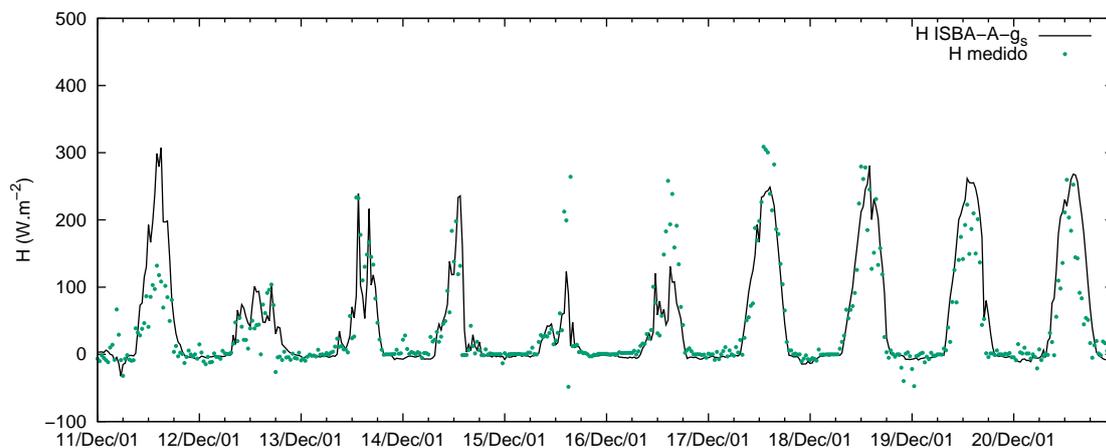


Figura 4.43: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2001.

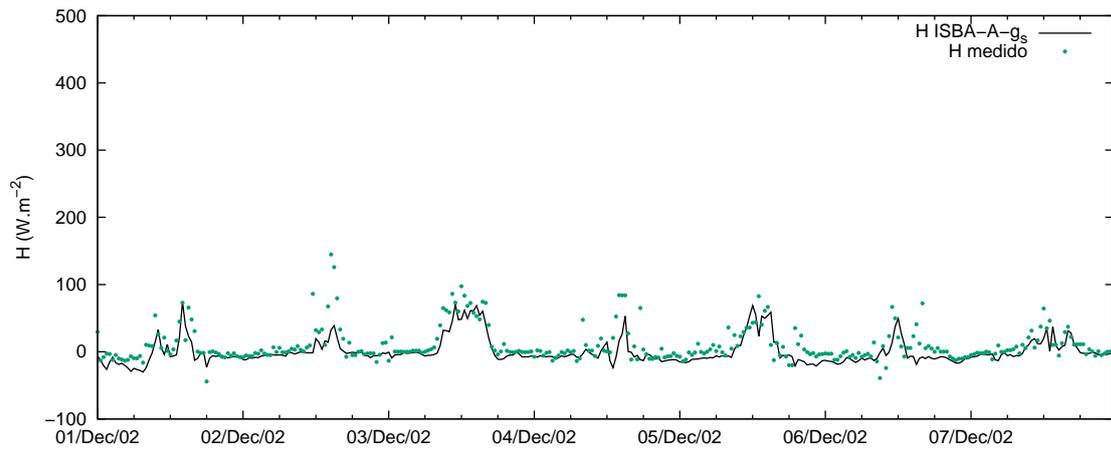


Figura 4.44: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor sensível medido em SLOU, dezembro de 2002.

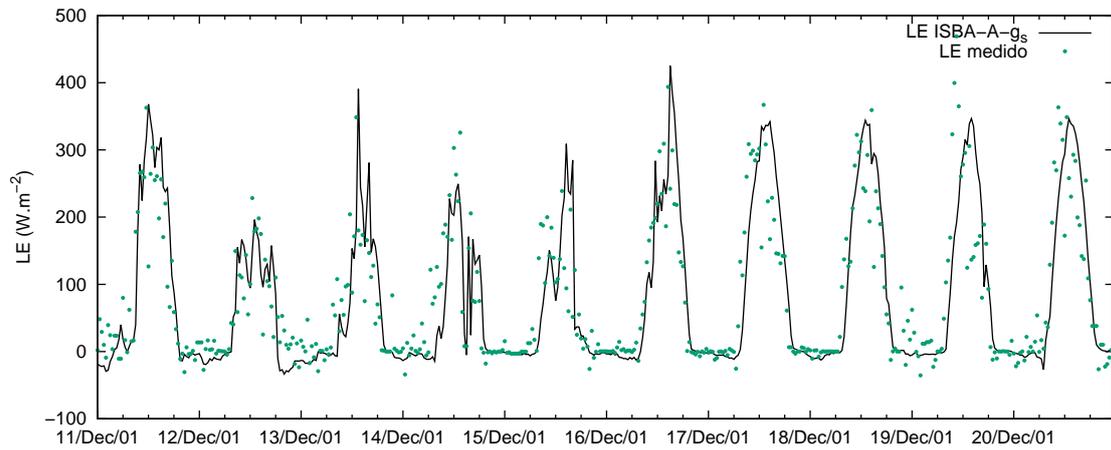


Figura 4.45: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2001.

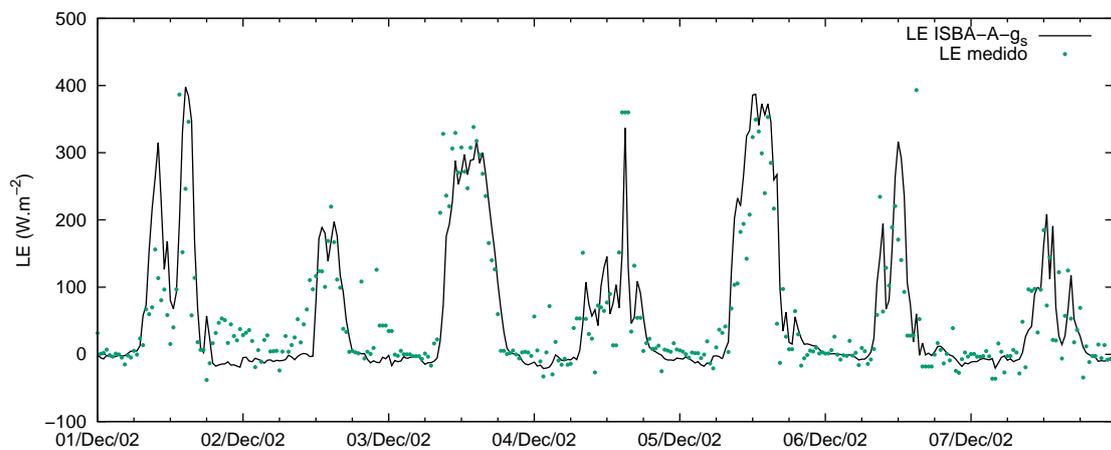


Figura 4.46: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs e fluxo de calor latente medido em SLOU, dezembro de 2002.

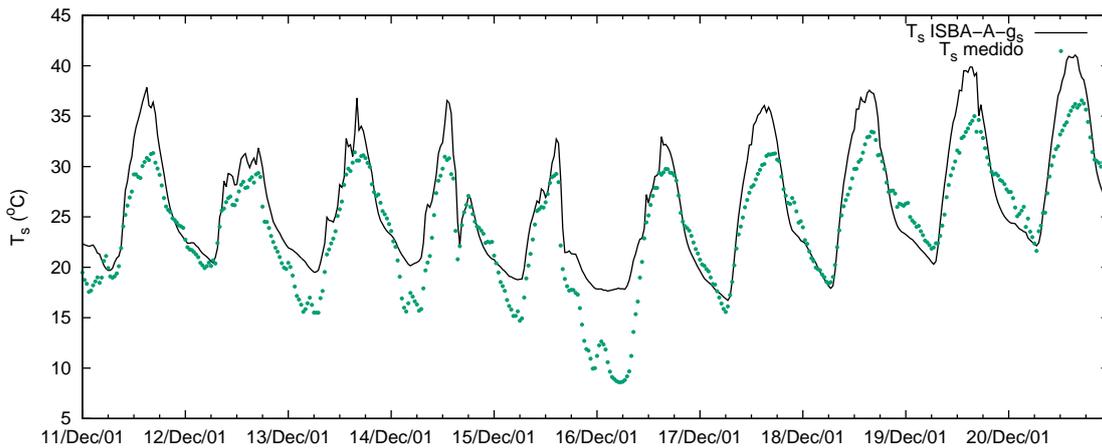


Figura 4.47: Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-A-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2001.

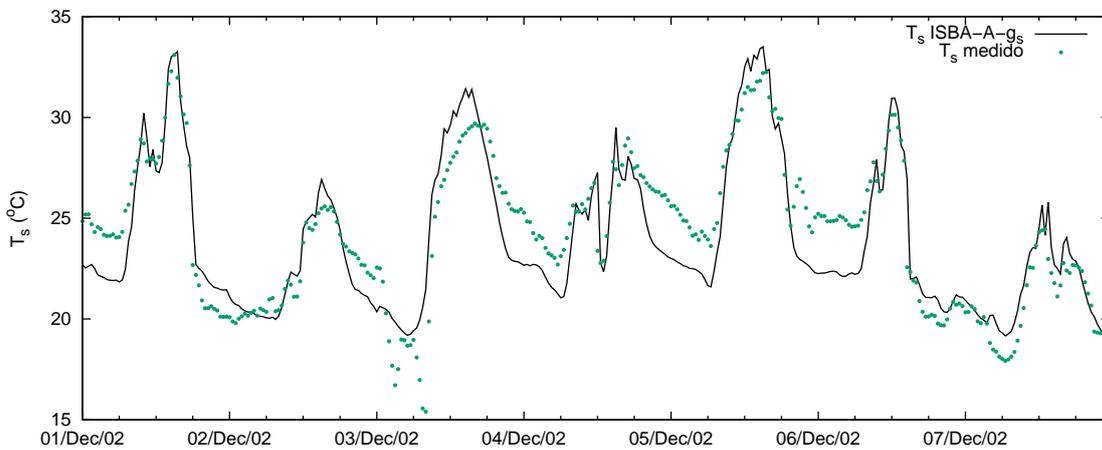


Figura 4.48: Temperatura estimada na interface superfície-atmosfera (T_s) pelo modelo ISBA-A-gs e temperatura medida na superfície em SLOU, dezembro de 2002.

na camada abaixo da zona de raízes (w_3) e umidade média retida sobre a vegetação (w_r).

Similarmente ao caso do ISBA-gs, as figuras (4.59)–(4.63) mostram resultados dos fluxos de calor latente particionados, além da condutância estomática e do fluxo de CO_2 . O resumo destes resultados estão mostrados na tabela (4.7). Novamente, não há medições para comparação.

Como já comentado, o ISBA-gs, a exemplo do modelo ISBA original de Noilhan e Planton (1989), modela a condutância no estômato de forma simplificada, e não contempla a respiração celular realizada no período noturno. O modelo ISBA-A-gs simula fisiologicamente este processo como pode ser visto nos períodos noturnos das figuras (4.63) e (4.64), e na tabela (4.7).

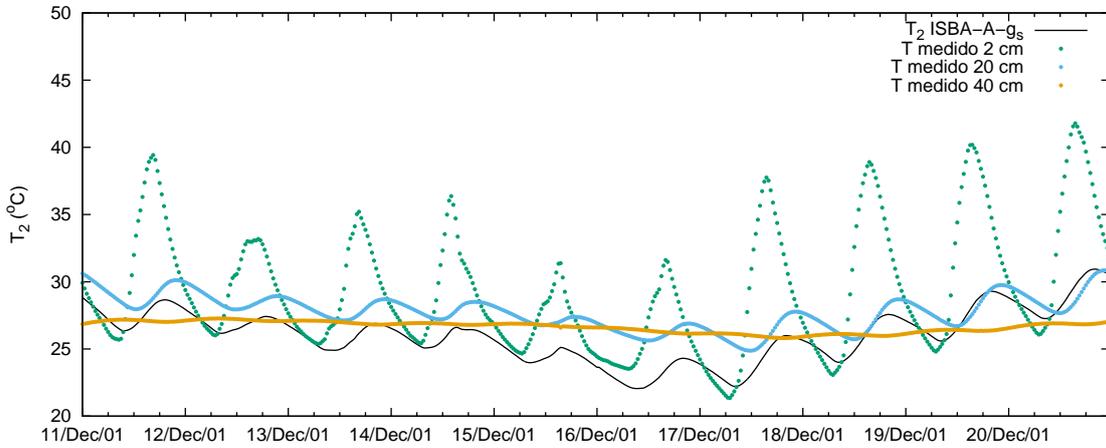


Figura 4.49: Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-A-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.

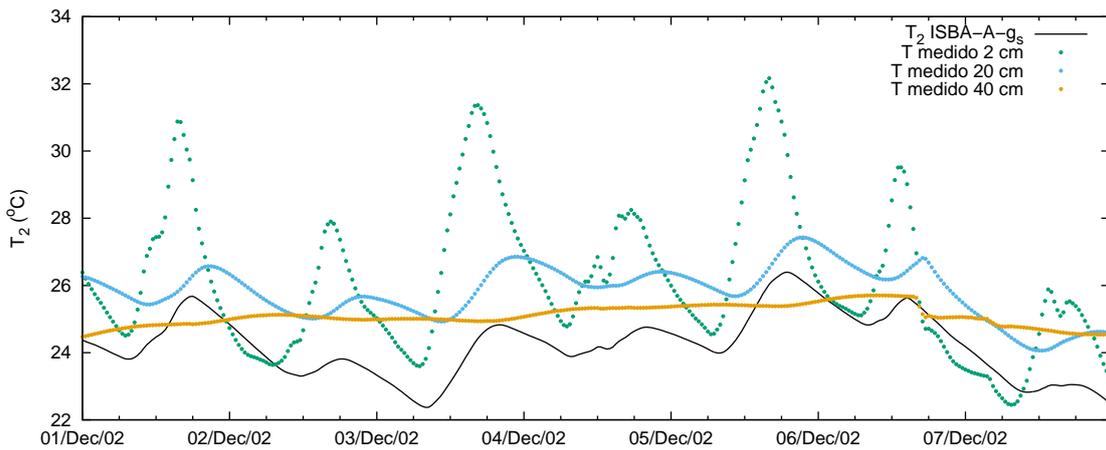


Figura 4.50: Temperatura média estimada na camada de raízes (T_2) pelo modelo ISBA-A-gs e temperaturas medidas no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.

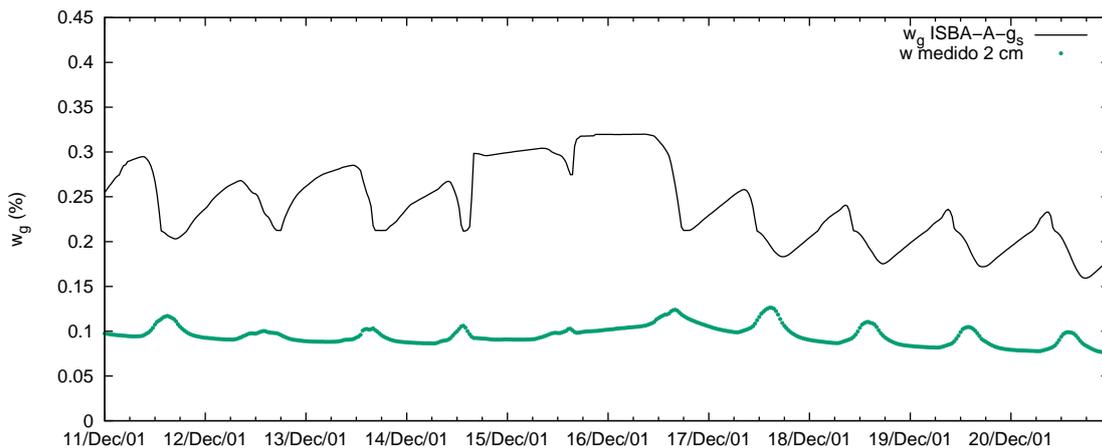


Figura 4.51: Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-A-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2001.

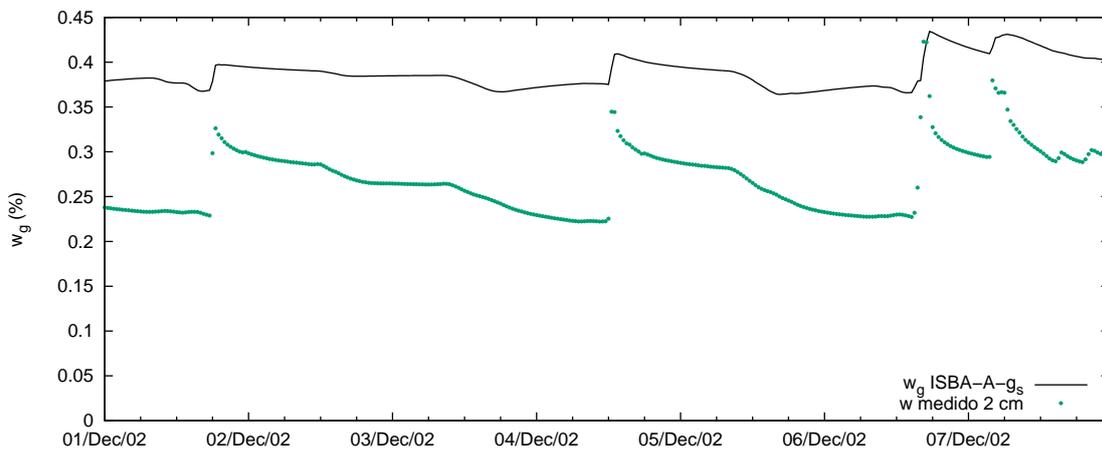


Figura 4.52: Umidade estimada na camada superficial de solo (w_g) pelo modelo ISBA-A-gs e umidade do solo medida a uma profundidade de 2 cm em SLOU, dezembro de 2002.

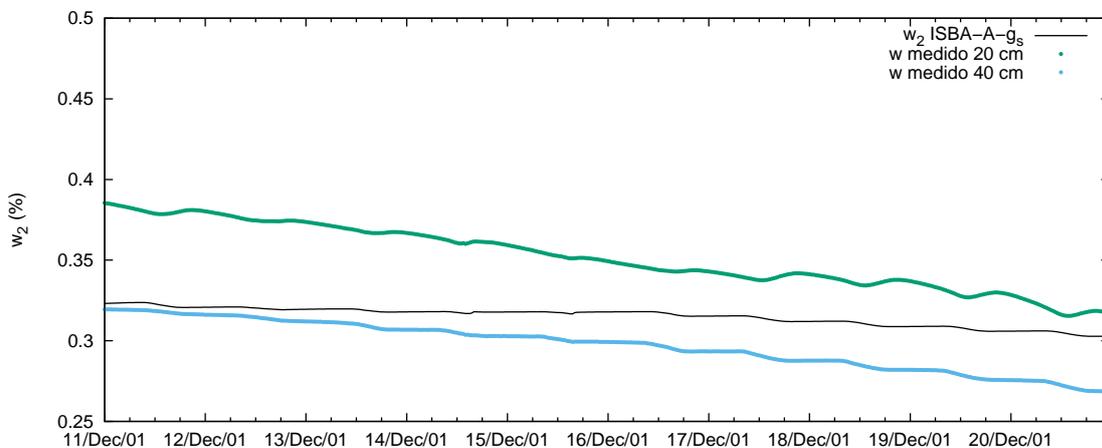


Figura 4.53: Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2001.

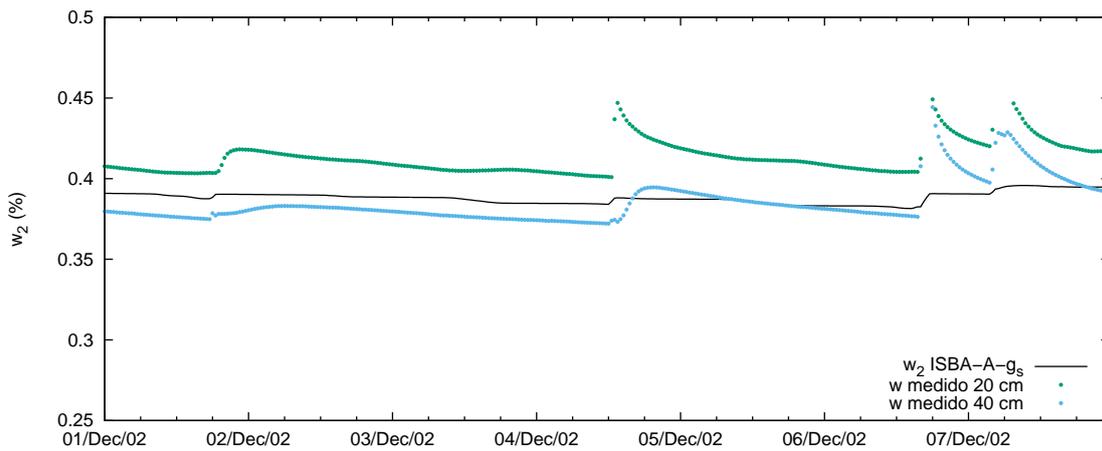


Figura 4.54: Umidade estimada na camada de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs e umidades do solo medidas nas profundidades de 20 e 40 cm em SLOU, dezembro de 2002.

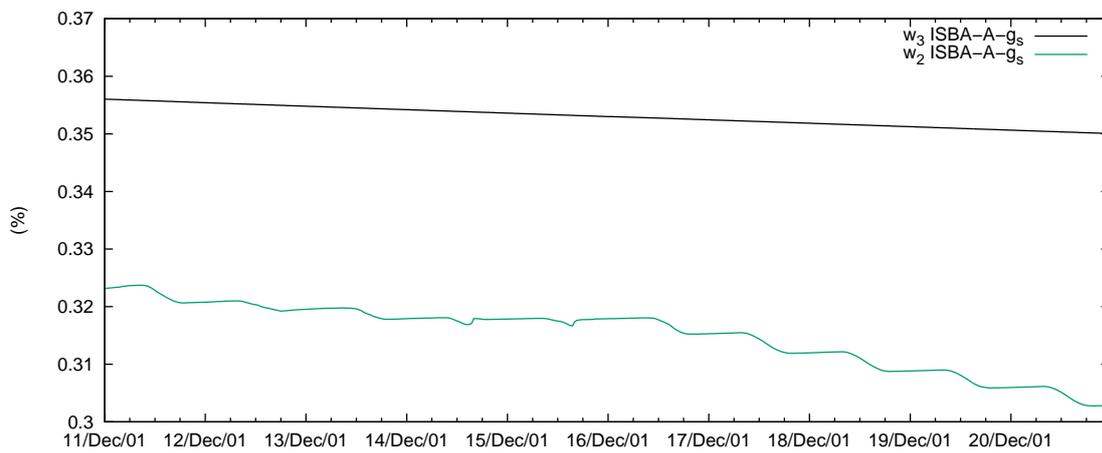


Figura 4.55: Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.

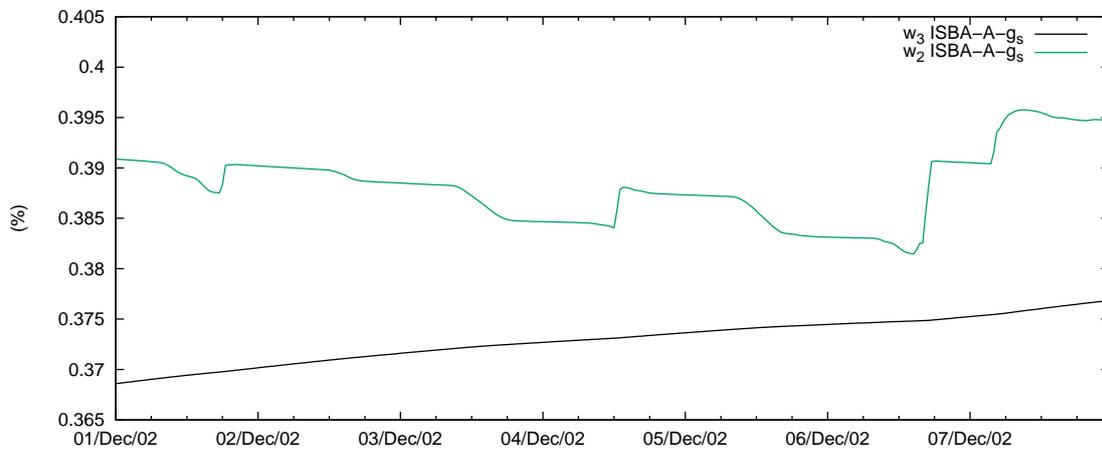


Figura 4.56: Umidades estimadas na camada de sub-raízes (w_3) e de raízes (w_2) pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.

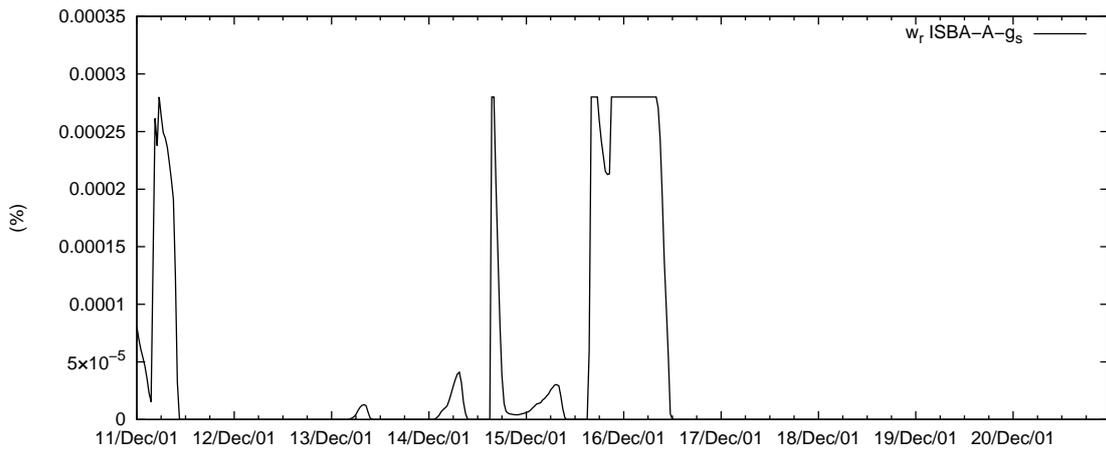


Figura 4.57: Umidade retida na vegetação (w_r) calculada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.

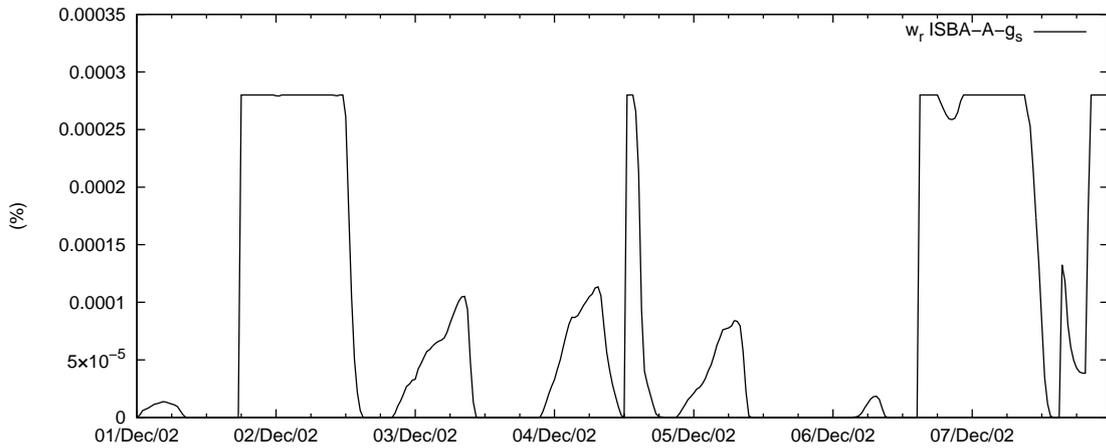


Figura 4.58: Umidade retida na vegetação (w_r) calculada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.

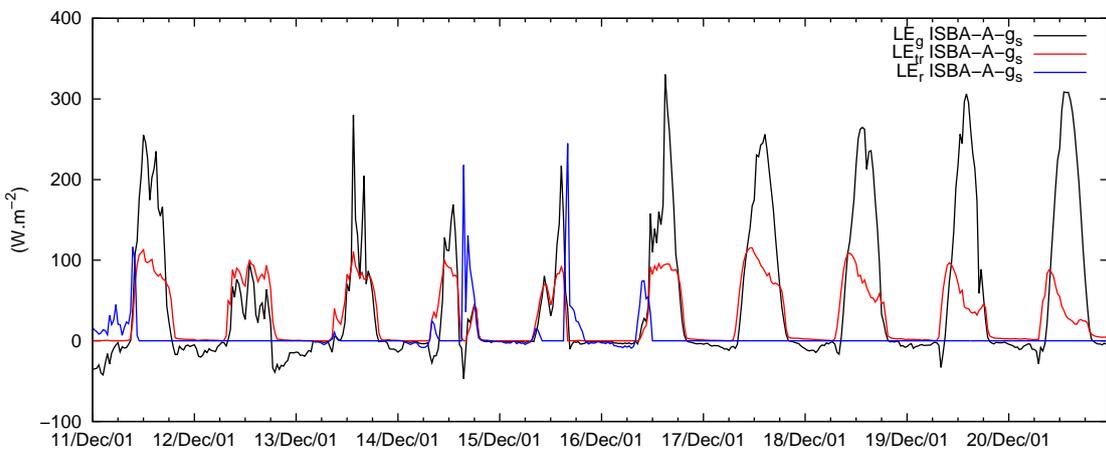


Figura 4.59: Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r), estimados pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.

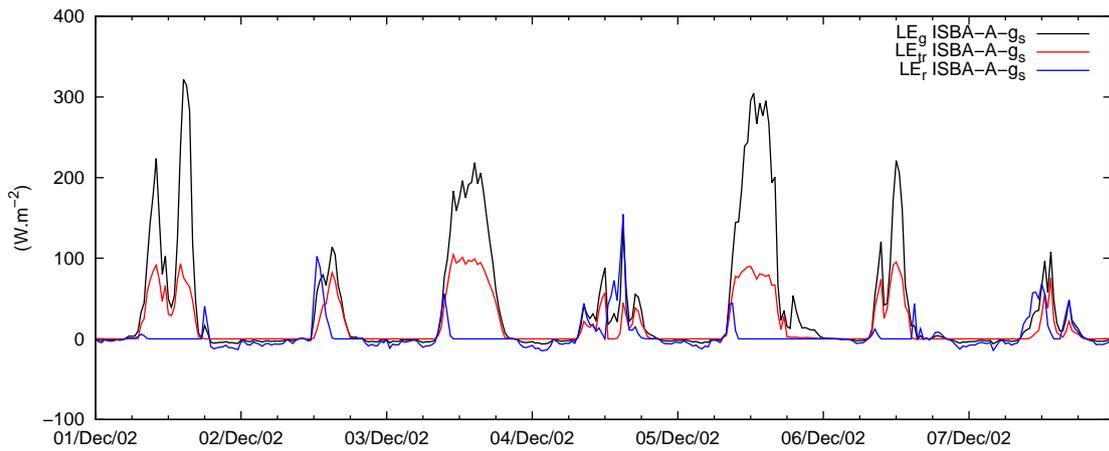


Figura 4.60: Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r) estimados pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.

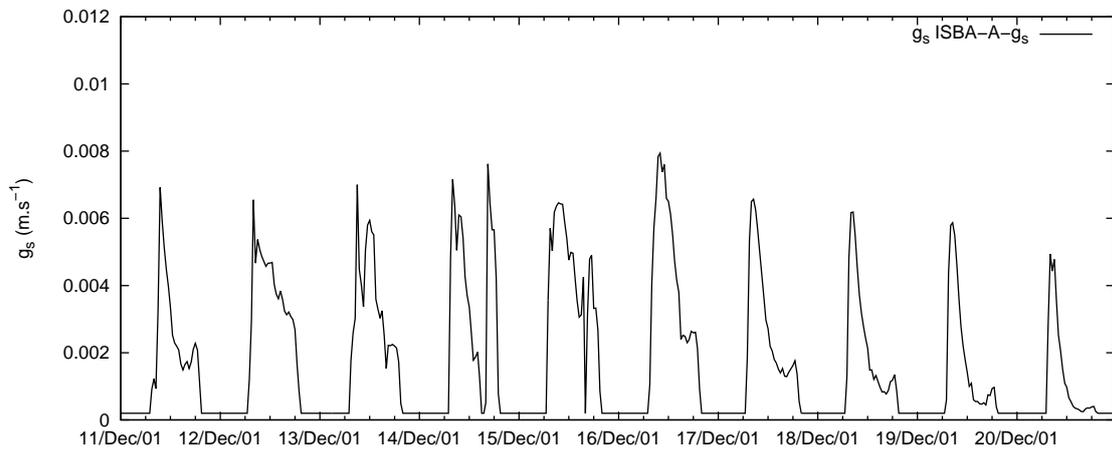


Figura 4.61: Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.

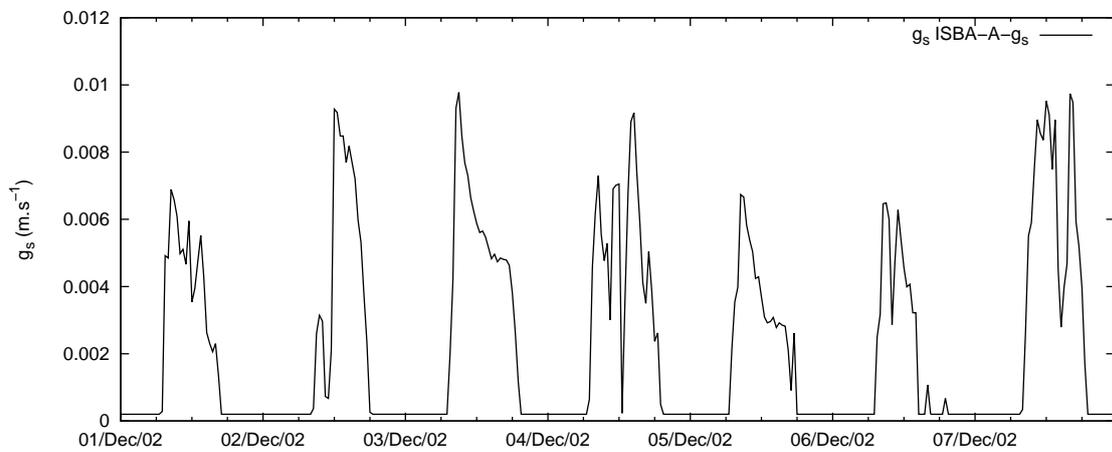


Figura 4.62: Condutância estomática de vapor d'água (g_s) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.

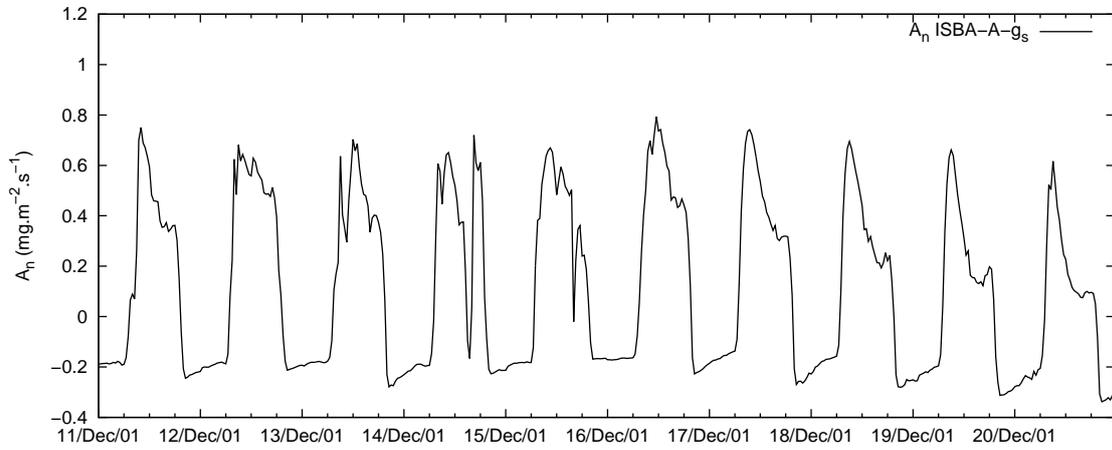


Figura 4.63: Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2001.

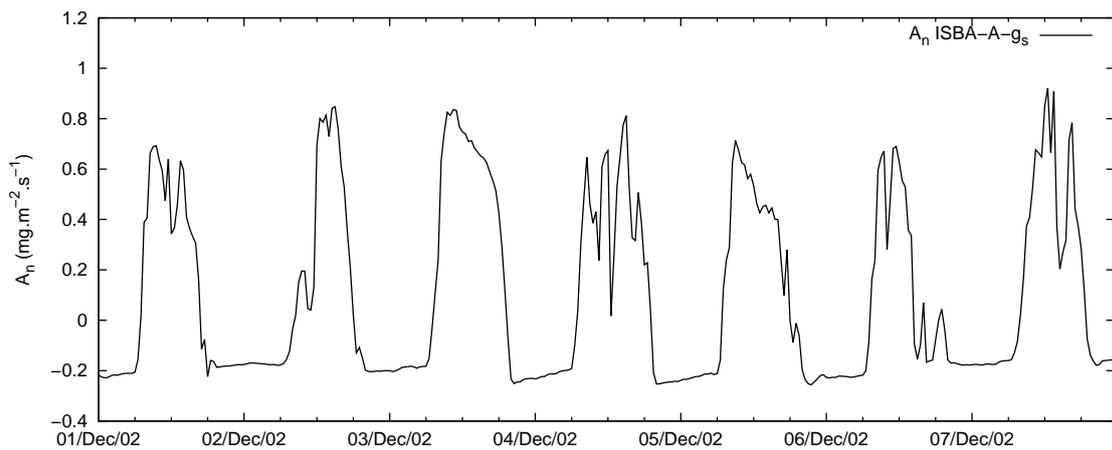


Figura 4.64: Assimilação líquida de carbono (A_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs em SLOU, dezembro de 2002.

ISBA-A-gs SLOU 2001				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
LE da evaporação no solo	$W m^{-2}$	45,3749	395,8666	-56,2736
LE da transpiração	$W m^{-2}$	31,5791	146,9079	0,0000
LE da evaporação direta na vegetação	$W m^{-2}$	2,5944	244,9376	-18,8827
Condutância estomática	$m s^{-1}$	0,00187	0,00881	0,00020
Assimilação líquida de CO_2	$mg m^{-2} s^{-1}$	0,13289	0,85091	-0,33809
ISBA-A-gs SLOU 2002				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
LE da evaporação no solo	$W m^{-2}$	52,9224	337,8523	-66,6336
LE da transpiração	$W m^{-2}$	25,9565	126,0087	0,0000
LE da evaporação direta na vegetação	$W m^{-2}$	2,7837	484,8669	-15,4354
Condutância estomática	$m s^{-1}$	0,00211	0,01003	0,00020
Assimilação líquida de CO_2	$mg m^{-2} s^{-1}$	0,13282	1,02108	-0,32737

Tabela 4.7: Análises do particionamento do fluxo de calor latente, em provenientes de, evaporação no solo (LE_g), transpiração (LE_{tr}) e evaporação direta na vegetação (LE_r). Condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 (A_n). Valores calculados em SLOU com o modelo ISBA-A-gs em dezembro de 2001 e 2002.

4.2 Aplicação em CMAYO, Argentina

Nesta seção os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs com espessuras de camadas calibradas para SLOU são aplicados no sítio experimental CMAYO. Não foi possível a comparação dos fluxos de calor sensível e latente do modelo com dados experimentais por indisponibilidade das medições em Posse et al. (2010). Porém, o experimento CMAYO dispõe de séries de radiação líquida e fluxos de CO_2 . Os valores de radiação líquida (R_n) medidos em CMAYO são interessantes para a validação do modelo pelo fato desta variável ter sido utilizada na calibração em SLOU. Já o fluxo de CO_2 medido é importante para se analisar e comparar as abordagens gs do tipo Jarvis e A-gs para estimativas da transpiração e fluxos de CO_2 , ambas presentes nos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs implementados no presente trabalho. É importante lembrar que medições de fluxos de carbono não foram feitas em SLOU.

4.2.1 Experimento de campo em CMAYO

Foram medidos em CMAYO (Posse et al., 2010) fluxos de CO_2 em uma plantação de soja pelo método de covariâncias turbulentas. Os equipamentos consistiram de um

analisador de gás infravermelho CO₂/H₂O e um anemômetro sônico. Também foram medidas temperatura média do ar, temperatura na superfície, temperatura do solo, umidade absoluta, radiação global e precipitação. As medições continuaram a ser realizadas inclusive após a etapa de crescimento pleno da soja, a fim de capturar os fluxos de CO₂ após a morte das plantas quando houve crescimento de ervas daninhas no local.

O experimento em CMAYO ocorreu entre os dias 19 de dezembro de 2008 e 31 de março de 2009, na latitude 34°31'34" S e longitude 58°39'55" W, a uma distância de aproximadamente 30 km a oeste de Buenos Aires na Argentina. O clima nesta região é temperado com temperatura média do ar de 24°C no verão e 10°C no inverno, com uma precipitação média anual de 1147 mm. O solo no local é classificado como Phaeozem e está localizado 30 m acima do nível do mar. Segundo Silveira e Rosa (2013) a estação de crescimento da cultura em 2008–2009 experimentou condições anormalmente secas o que resultou em má produtividade da cultura. Durante este período de seca a precipitação foi de 182,9 mm entre outubro e dezembro de 2008, e 233,6 mm entre janeiro e março de 2009. Como forma de comparação a média histórica de mais de trinta anos (1961–1990) foi de 320 mm entre outubro e dezembro e 375 mm entre janeiro e março.

No final de janeiro teve início a senescência e em meados de fevereiro a cultura de soja pereceu, ocorrendo então sucessão secundária por plantas daninhas. O campo tem sido dedicado ao plantio direto de soja em cultivo de monocultura desde 1988 e é gerido por semeadura direta. A semeadura ocorre geralmente em outubro e a colheita em março. Após a colheita o campo é abandonado até a próxima estação de crescimento ocorrendo sucessão secundária por ervas daninhas. Em 2008 a semeadura ocorreu em 2 de outubro. A distância entre linhas de plantio foi de 0,55 m.

O experimento em CMAYO se deu em três fases. Na primeira as plantas de soja estavam no seu pico de crescimento, na segunda período as plantas estavam na fase de senescência, e na terceira o campo foi abandonado e espécies de plantas daninhas se estabeleceram. Segundo Posse et al. (2010) no primeiro período, quando as plantas de soja atingiram o auge de crescimento, o valor do maior fluxo de carbono registrado foi em torno de 1,0 mg m⁻² s⁻¹. À noite os maiores valores do fluxo de

CO₂ liberado para a atmosfera pela respiração foi em torno de 0,2 mg m⁻² s⁻¹. Nesse primeiro período a média do *I AF* foi de 1,05 com valores entre 0,7 e 1,4. Devido à estiagem no verão de 2008–2009 a colheita não alcançou a altura máxima como em condições normais.

Posse et al. (2010) concluiu que os dados de fluxo de carbono diurno tiveram uma relação significativa com as seguintes variáveis ambientais: radiação global, déficit de pressão de vapor e temperatura do ar. Houve uma correlação positiva com a radiação global e negativa em relação ao déficit de pressão de vapor e temperatura do ar. No segundo período a taxa máxima em que carbono foi assimilado esteve na ordem de 0,3 mg m⁻² s⁻¹. À medida que a plantação epereceu, a respiração prevaleceu sobre a fotossíntese. Posse et al. (2010) ainda apontou para o fato de que no segundo período a correlação entre a radiação global e a temperatura do ar com o fluxo de carbono foi negativa e com o déficit de pressão de vapor foi positiva.

Forçantes meteorológicas

As séries temporais disponíveis do experimento CMAYO são médias horárias. Os dados de precipitação entretanto são do acumulado diário não sendo especificado qual o período exato de ocorrência. A localização temporal da chuva ao longo do dia foi então diagnosticada usando dados de radiação, já que verificou-se períodos em que a mesma variou subitamente, provavelmente devido à passagem de nuvens carregadas.

Não houve medições de radiação refletida em CMAYO, sendo então definido um valor percentual em relação à radiação incidente baseado no albedo da vegetação para o período de estudo (soja em pleno desenvolvimento). O albedo é um parâmetro importante no balanço de energia de uma superfície e bastante utilizado em modelos climáticos e agrometeorológicos. Segundo de MVBR Leitão et al. (2002) este parâmetro nem sempre está disponível visto que sua medida não é efetuada de forma rotineira como ocorre com muitos outros parâmetros meteorológicos. Wang et al. (2001) descreveram que em sistemas ecológicos o albedo controla as condições microclimáticas das culturas e sua absorção de radiação afetando aspectos físicos, fisiológicos e processos biogeoquímicos, tais como o balanço de energia, evapotranspiração, fotossíntese e respiração.

Com relação à variação anual, é de se esperar maiores valores de albedo durante o inverno em relação ao verão para a área de estudo, devido à latitude. Segundo de Souza et al. (2010), no início do plantio quando o solo se encontra parcialmente coberto o albedo de uma plantação de soja fica em torno de 0,16–0,17 representando uma combinação entre o solo nú e a cultura. Com o crescimento das plantas e do *IAF* (índice de área foliar), o albedo atinge um valor em torno de 0,24. Blad e Baker (1972) encontraram para a cultura de soja um albedo médio diário variando de 0,24–0,27 quando a cultura cobria totalmente o solo. Com o declínio do *IAF* e início da senescência a redução do albedo da cultura atingiu um valor de 0,14.

Algumas considerações tiveram que ser feitas com relação à escolha do albedo para CMAYO. Um fator de grande importância na variação horária do albedo é a elevação e a inclinação do terreno, que não puderam ser analisados nesta pesquisa por desconhecimento do relevo na ponto de estudo. Nesta pesquisa o efeito da umidade do solo nu foi desprezado na escolha do albedo pelo fato do estudo em CMAYO ser no período de pleno desenvolvimento da cultura de soja, de maneira que o solo nesta fase está bastante encoberto pela vegetação. Com relação à latitude é de se esperar que o albedo para a área de estudo em CMAYO seja um pouco acima da encontrada por de Souza et al. (2010) que realizaram sua pesquisa em uma região de baixa latitude. Como em CMAYO era conhecido o *IAF*, este fator foi levado em consideração. Com todos estes fatores levados em conta, o valor adotado no presente trabalho foi de 0,27.

Não foram disponibilizadas as medições de velocidade e direção do vento da campanha de Posse et al. (2010). Foram então utilizados dados da estação próxima, denominada Aeroparque BS AS, localizada em Buenos Aires nas coordenadas geográficas 34°34'1,2" S e 58°25'1,2" W, obtidos no portal (<http://www.freemeteo.com.pt>).

Gallegos et al. (2004) mediram em San Miguel na província de Buenos Aires a razão $RFA/($ radiação global) na ordem de 51 % para condições nubladas, 47 % para céu parcialmente nublado e 45 % para condições de céu claro. No presente estudo foi adotado $RFA(I_a)$ igual a 45 % da radiação global devido ao período seco com ausência de nebulosidade no qual a pesquisa foi realizada.

Nas figuras (4.65)–(4.70) são mostradas as variáveis que forçaram os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs, e a evolução do *IAF* em CMAYO entre os dias 25 de dezembro

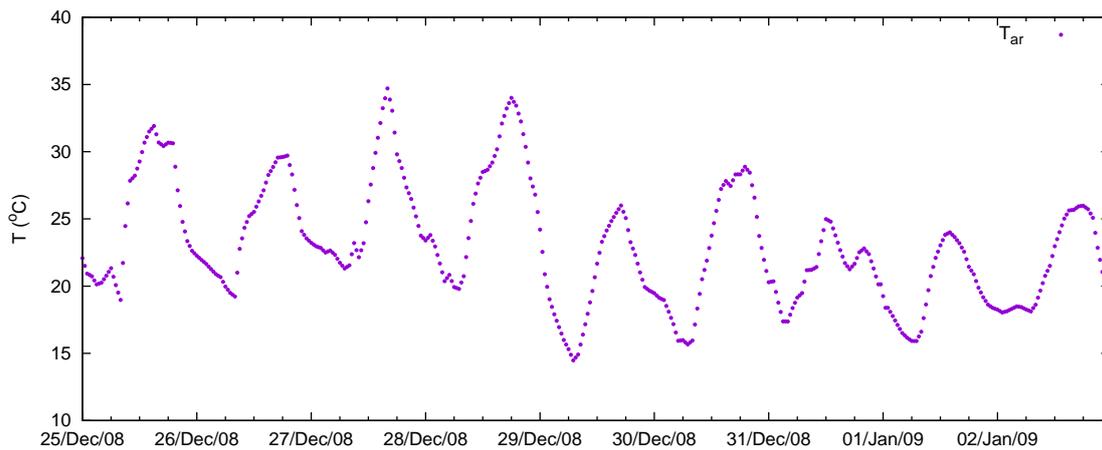


Figura 4.65: Temperatura do ar medida em CMayo (T_{ar}) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.

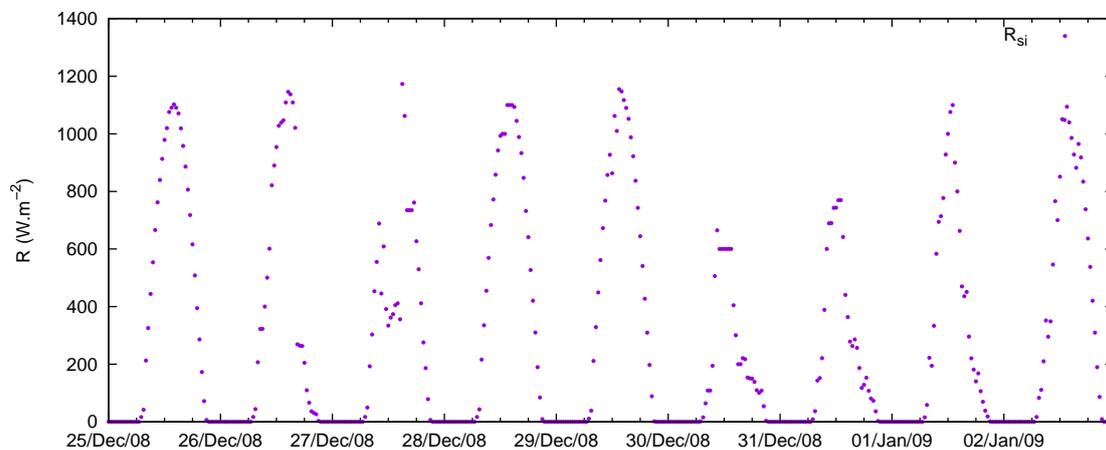


Figura 4.66: Radiação solar incidente medida em CMayo (R_{si}) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.

de 2008 e 3 de janeiro de 2009. Na tabela (4.8) são apresentadas as médias, máximas e mínimas para cada variável no período de estudo.

A tabela (4.9) resume os dados de radiação líquida e assimilação líquida de CO_2 medidos nos experimentos de campo em CMayo entre os dias 23 e 31 de dezembro de 2008 que foram utilizados para comparar com os resultados prognósticos calculados pelo modelos.

4.2.2 Simulação com ISBA-gs

Os resultados do modelo ISBA-gs (calibrado em SLOU) para CMayo são mostrados nesta seção. Obviamente foram feitas as devidas modificações em alguns parâmetros (como pressão atmosférica e densidade do ar) referentes às condições locais.

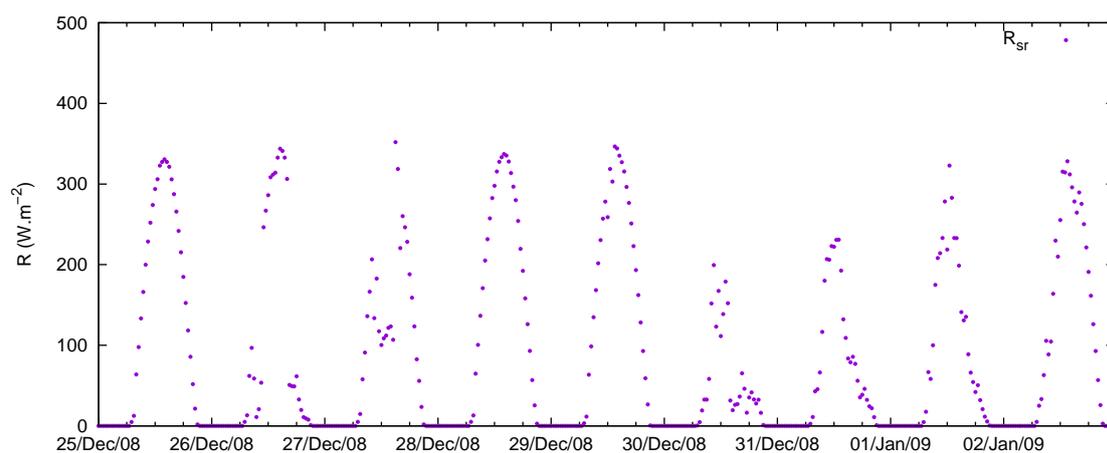


Figura 4.67: Radiação solar refletida medida em CMAYO (R_{sr}) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.

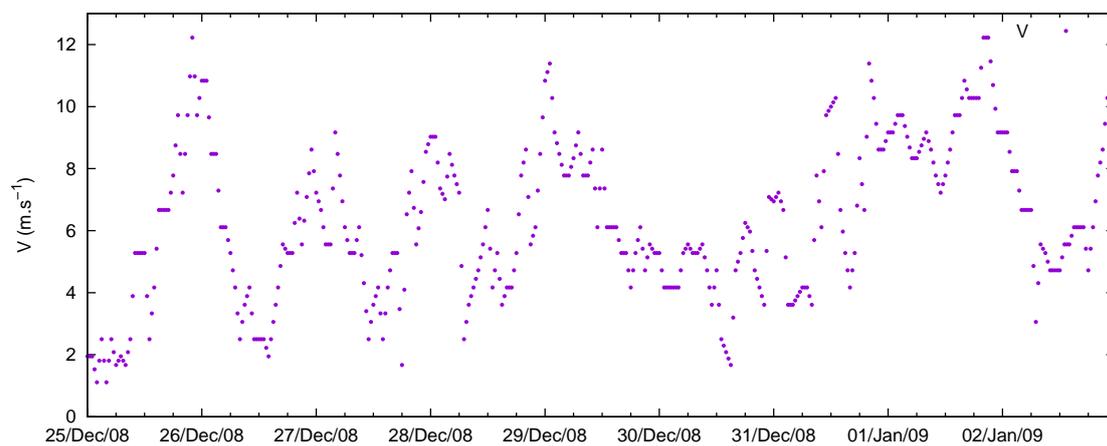


Figura 4.68: Velocidade do vento medida em CMAYO (V) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.

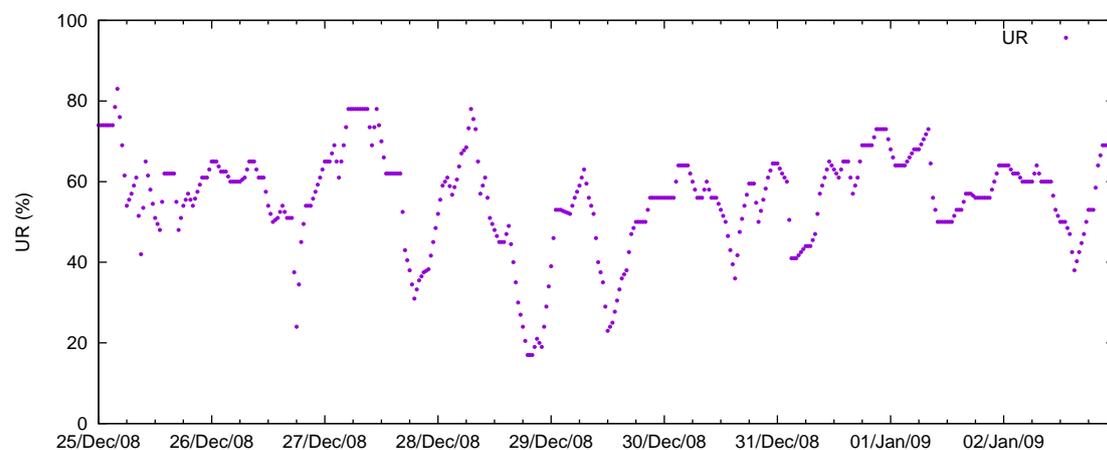


Figura 4.69: Umidade relativa medida em CMAYO (UR) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.

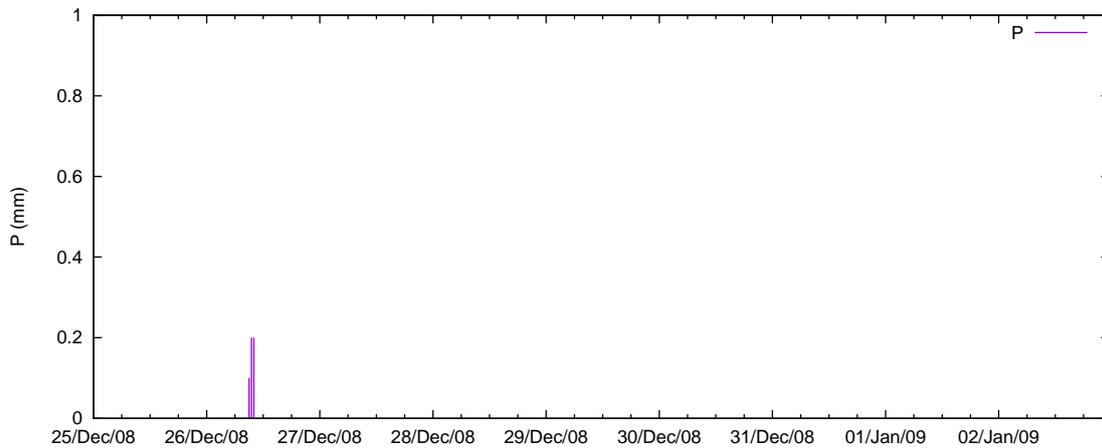


Figura 4.70: Precipitação medida em CMayo (P) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.

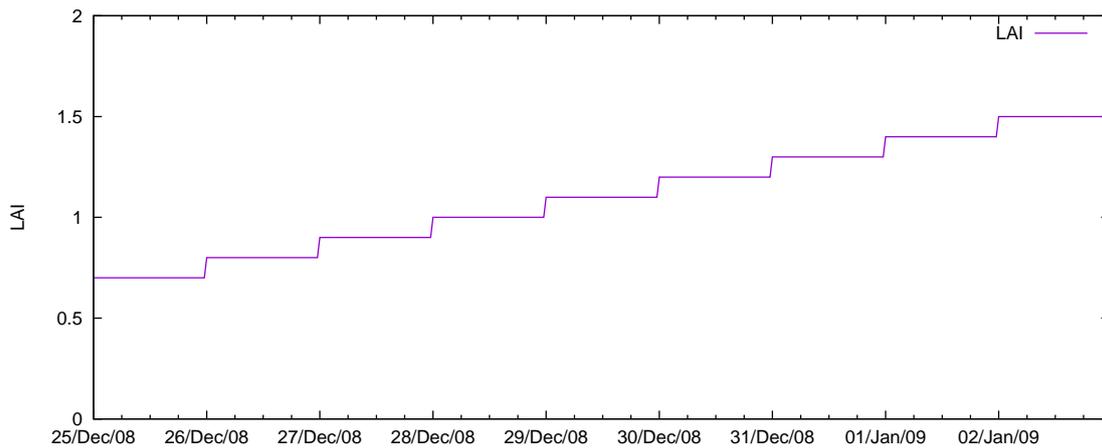


Figura 4.71: IAF estimado em CMayo (LAI) entre os dias 25 de dezembro de 2008 e 2 de janeiro de 2009.

Dado medido	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Temperatura do ar	°C	23,19816	34,71000	14,47000
Radiação solar incidente	$W m^{-2}$	305,42017	1173,00000	0,00000
Radiação solar refletida	$W m^{-2}$	89,56683	351,89999	0,00000
Velocidade do vento	$m s^{-1}$	6,09532	12,22222	1,11111
Umidade relativa	%	59,33200	100,00000	11,51195
Precipitação	mm	0,00098	0,20000	0,00000

Tabela 4.8: Análise dos dados forçantes medidos no experimento de campo em CMayo, entre os dias 23 de dezembro de 2008 e 3 de janeiro de 2009.

Argentina, 23–31/12/2008				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Radiação líquida	W m^{-2}	129,5233	659,0000	-103,2000
Assimilação líquida de CO_2	$\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$	0,2172	0,9499	-0,2980

Tabela 4.9: Análises da radiação líquida (R_n) e da assimilação líquida de CO_2 , medidos no experimento de campo em CMAYO entre os dias 23 e 31 de dezembro de 2008.

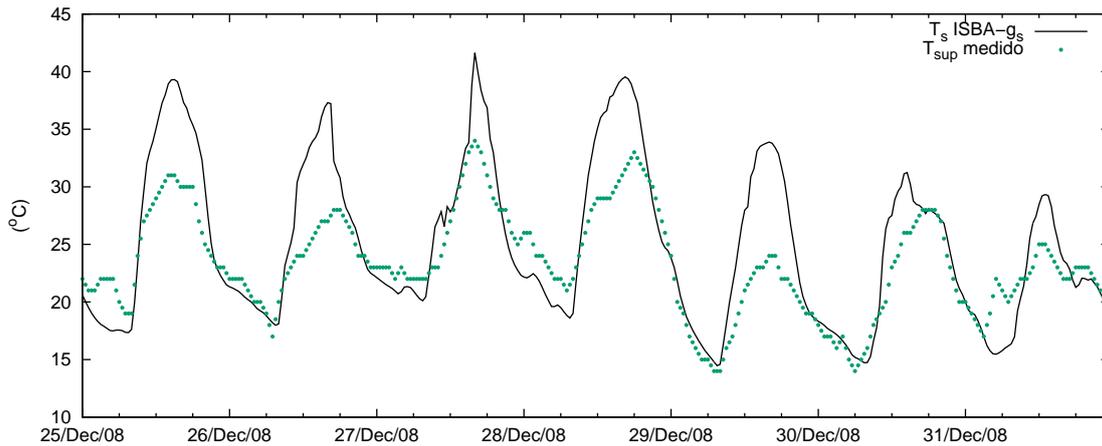


Figura 4.72: Temperatura calculada pelo ISBA-gs na interface superfície-atmosfera (T_s) e temperatura medida próximo a superfície (T_{sup}), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

Variáveis prognósticas principais

Nas figuras (4.72)–(4.75) são mostradas as variáveis prognósticas principais calculadas com o modelo ISBA-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008: temperatura na superfície (T_s), temperatura na camada da zona de raízes (T_2), umidade média na camada superficial (w_g), umidade média na camada da zona de raízes (w_2), umidade média na camada abaixo da zona de raízes (w_3) e umidade média retida sobre a vegetação (w_r). Também estão mostrados dados observados da temperatura no solo e da temperatura (3,5 m acima da superfície) realizadas por Posse et al. (2010). No entanto as comparações devem ser feitas com cautela devido ao fato de não ser conhecida a profundidade exata em que foi medida a umidade, além do modelo simular a temperatura média nas camadas. Com relação à temperatura superficial, no modelo ela se refere à interface solo-atmosfera enquanto que os valores medidos ocorreram à altura de 3,5 m. Novamente, deve-se ser cauteloso ao comparar estas temperaturas.

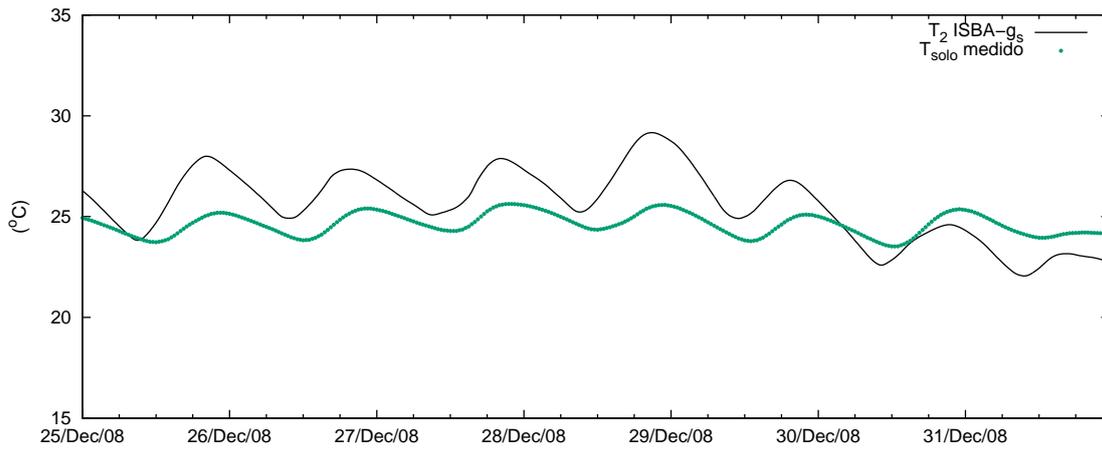


Figura 4.73: Temperatura média calculada pelo ISBA-gs na camada de raízes (T_2) e temperatura medida no solo (T_{solo}), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

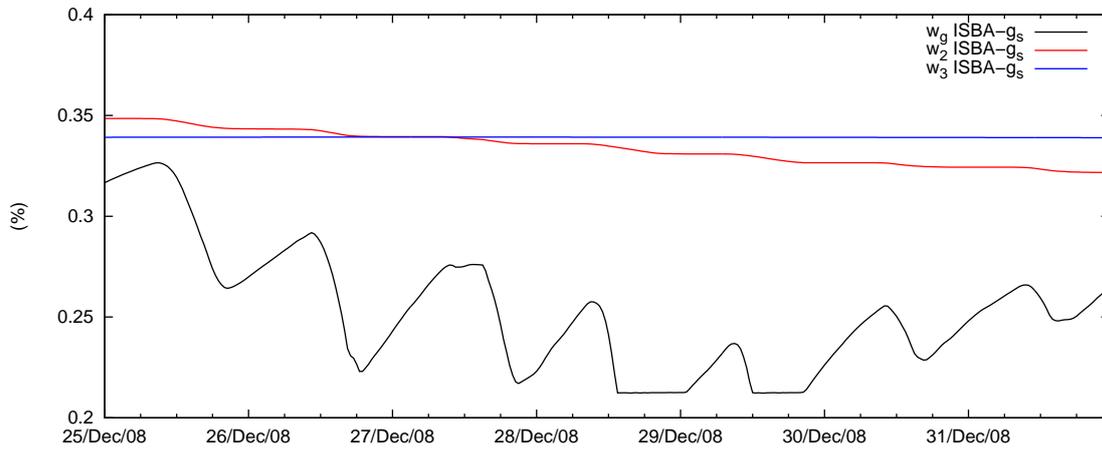


Figura 4.74: Umidades calculadas pelo ISBA-gs na camada superficial de solo (w_g), camada de raízes (w_2) e camada abaixo da zona de raízes (w_3), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

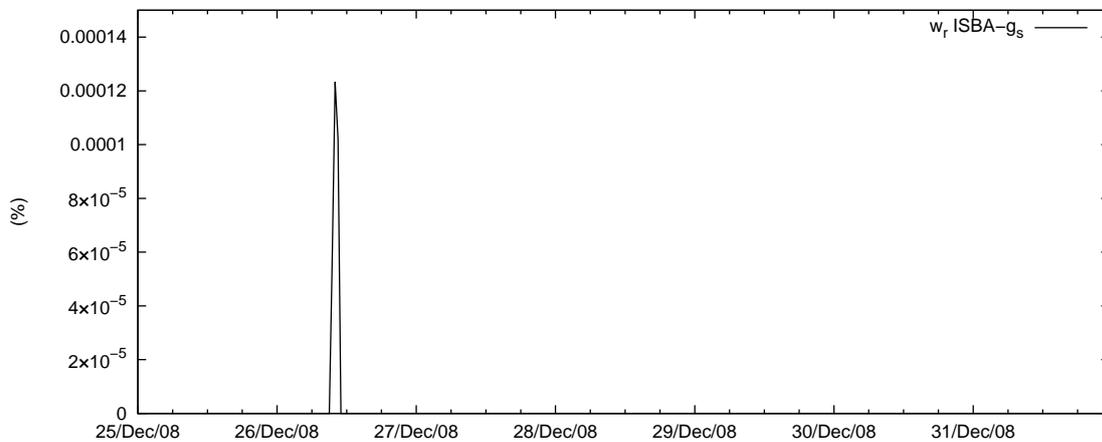


Figura 4.75: Umidade calculada pelo ISBA-gs na vegetação (w_r), em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

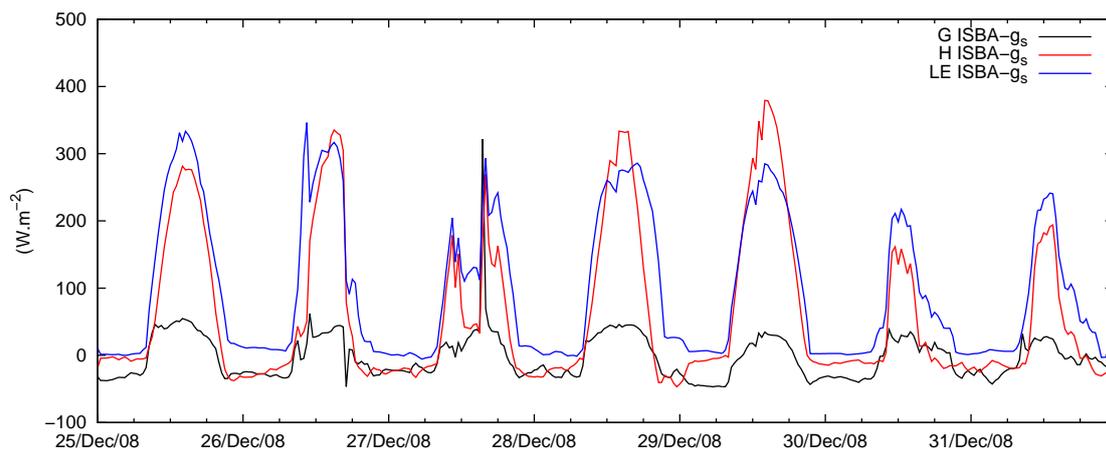


Figura 4.76: Fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e calor absorvido pelo solo (G), calculados pelo ISBA-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

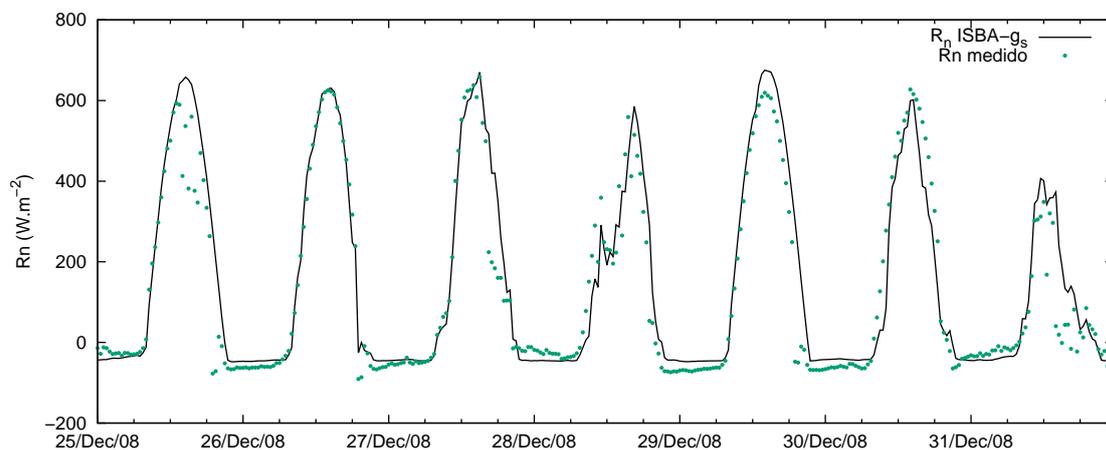


Figura 4.77: Radiação líquida (R_n) calculada pelo ISBA-gs e medida em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

Fluxos e radiação líquida prognósticos

São apresentados nas figuras figuras (4.76) e (4.77) o fluxo de calor no solo (G), o fluxo de calor sensível (H), o fluxo de calor latente (LE) e a radiação líquida (R_n). É também apresentada a radiação líquida medida. O fluxo de calor latente total foi ainda particionado em fluxo de calor latente do solo (LE_g), fluxo de calor latente da transpiração (LE_{tr}) e fluxo de calor latente direto da vegetação (LE_r) (figura 4.78).

Condutância estomática

Nas figuras (4.79) e (4.80), são mostrados os resultados do modelo ISBA-gs para as variáveis de condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação de CO_2 em

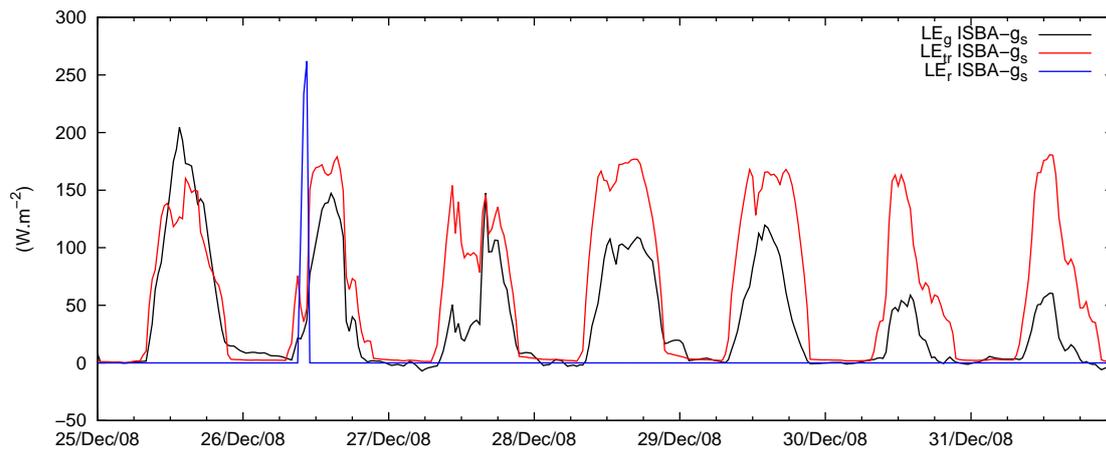


Figura 4.78: Fluxos de calor latente da evaporação do solo (LE_g), calor latente na transpiração (LE_{tr}) e calor latente da evaporação direta da vegetação (LE_r) calculados pelo ISBA-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

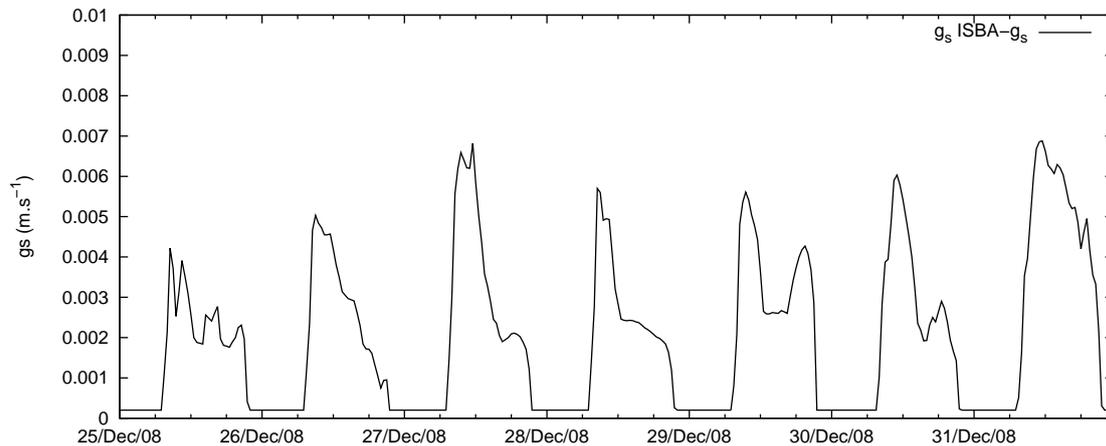


Figura 4.79: Condutância estomática de vapor d'água (g_s) calculada pelo ISBA-gs em Campo de Mayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

comparação com dados medidos de fluxo de CO_2 em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008. O resumo dos resultados estão na tabela (4.10).

Novamente aparece a deficiência do modelo do tipo Jarvis da condutância no estômato. Na figura (4.80) e na tabela (4.10) nota-se a inexistência do fluxo negativo de CO_2 . Este problema é “corrigido” pela módulo A-gs no ISBA-A-gs, mostrado a seguir.

4.2.3 Simulação com ISBA-A-gs

Nesta seção aplica-se o modelo ISBA-A-gs calibrado em SLOU para a plantação de soja em CMAYO e compara-se os resultados com os dados medidos.

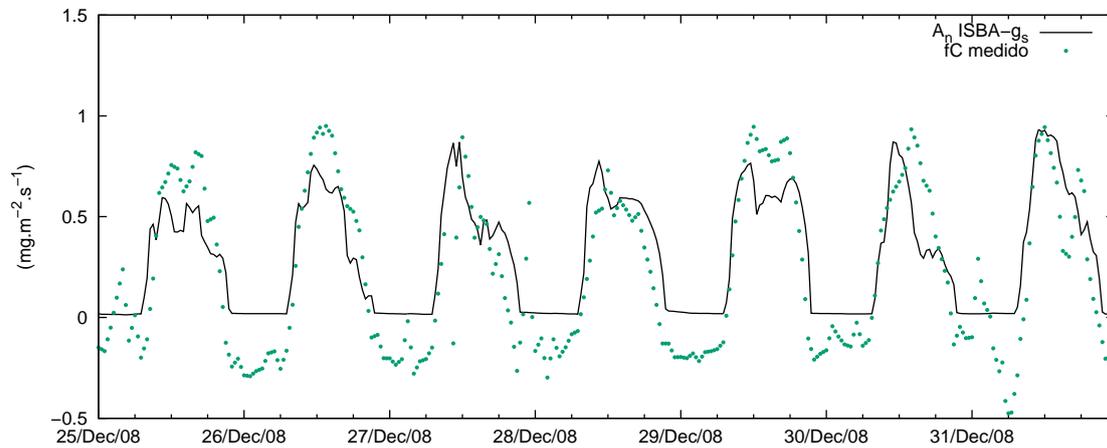


Figura 4.80: Fluxos de carbono calculado pelo ISBA- g_s (A_n) e medido (fC) em Campo de Mayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

ISBA- g_s Argentina 2008				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Condutância estomática	m s^{-1}	0,00219	0,00794	0,00020
Assimilação líquida de CO_2	$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0,31088	1,08192	0,01152

Tabela 4.10: Análises da condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 (A_n), calculada pelo ISBA- g_s em CMAYO entre os dias 23 e 31 de dezembro de 2008.

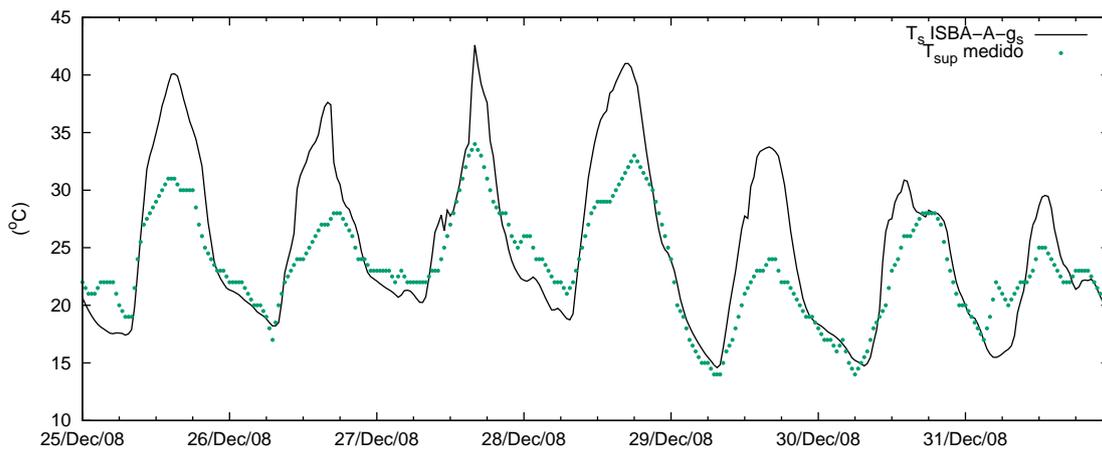


Figura 4.81: Temperatura calculada pelo ISBA-A-gs na interface superfície-atmosfera (T_s) e temperatura medida próximo a superfície (T_{sup}) em CMayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

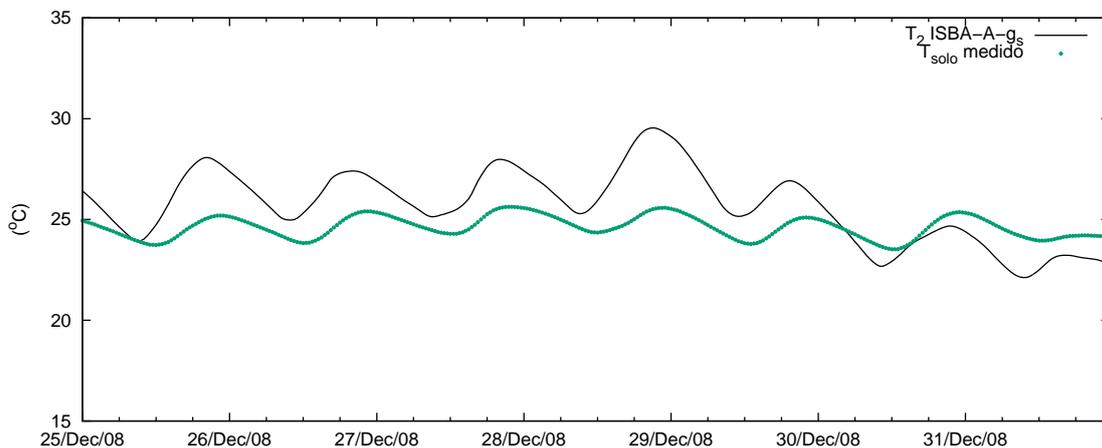


Figura 4.82: Temperatura média calculada pelo ISBA-A-gs na camada de raízes (T_2) e temperatura medida no solo (T_{solo}) em CMayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

Variáveis prognósticas principais

Similarmente ao caso do ISBA-gs, as figuras (4.81 a 4.84) mostram resultados do modelo ISBA-A-gs para umidade do solo e temperatura superficial.

Fluxos e radiação líquida

As figuras (4.85) e (4.86) mostram os resultados do modelo ISBA-A-gs para CMayo dos fluxos de calor sensível, latente e no solo, além da radiação que é comparada com dados medidos. O fluxo de calor latente total foi novamente particionado em fluxo de calor latente do solo (LE_g), fluxo de calor latente da transpiração (LE_{tr}) e

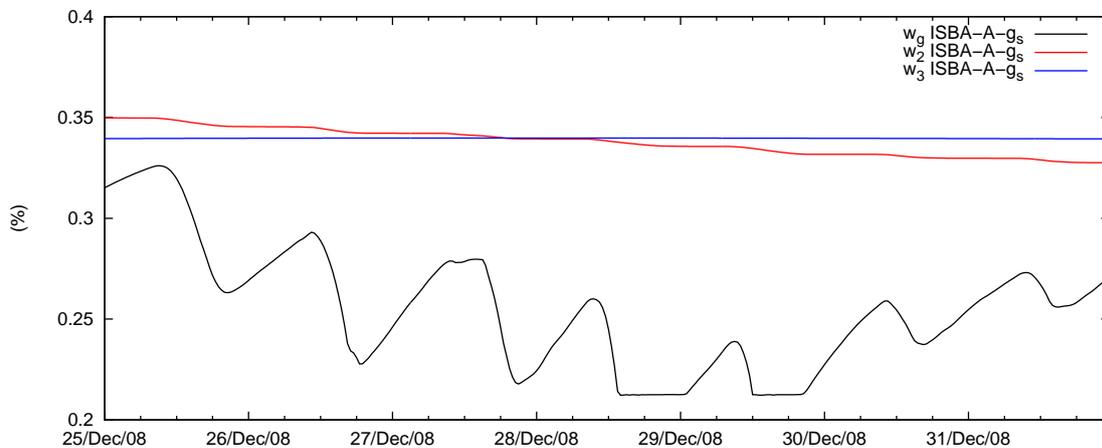


Figura 4.83: Umidades calculadas pelo ISBA-A-gs na camada superficial de solo (W_g), na camada de raízes (W_2) e na camada abaixo da zona de raízes (W_3) em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

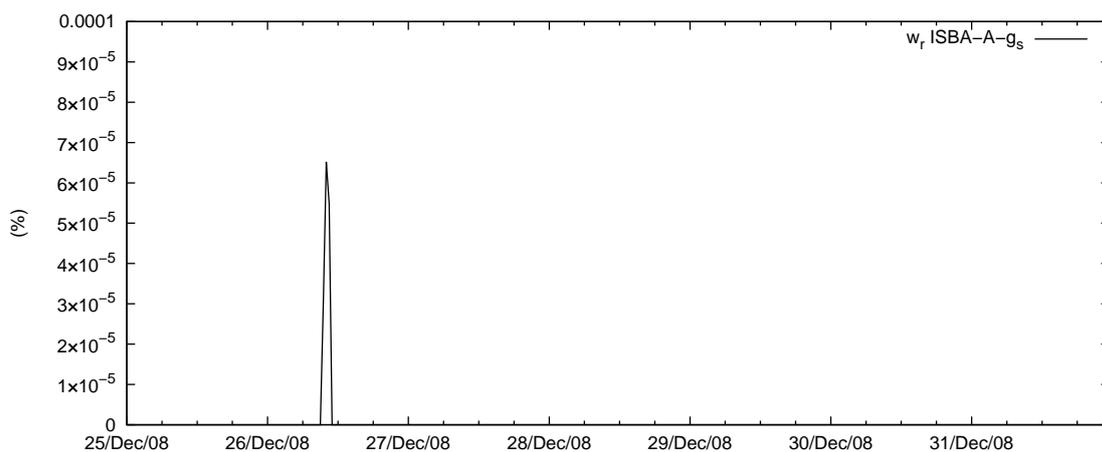


Figura 4.84: Umidade retida na vegetação (w_r) calculada pelo ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

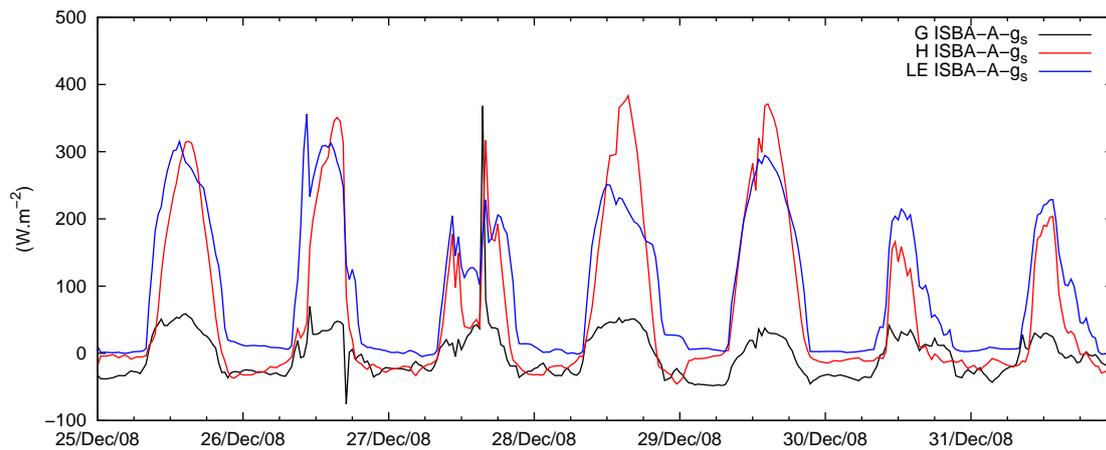


Figura 4.85: Fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e calor absorvido pelo solo (G), calculados pelo ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

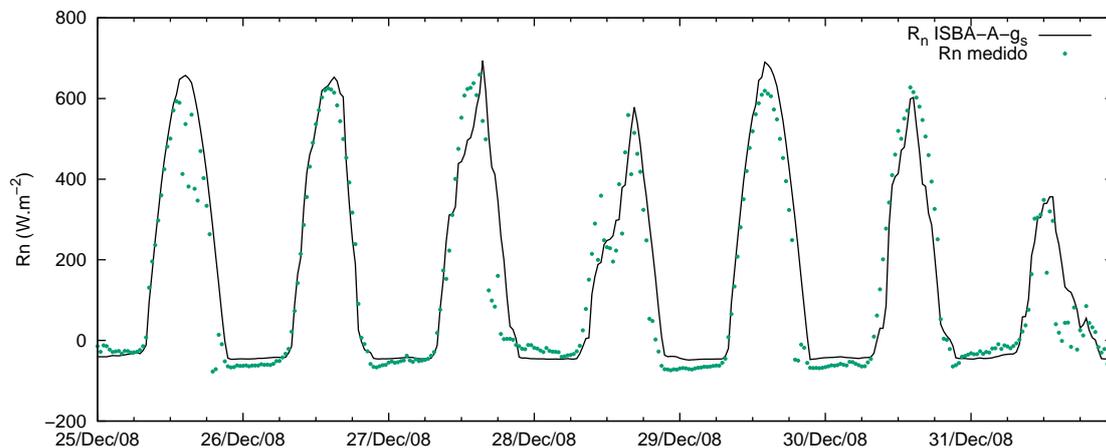


Figura 4.86: Radiação líquida (R_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs e radiação líquida medida em Campo de Mayo entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

fluxo de calor latente direto da vegetação (LE_r) (figura 4.87).

Condutância Estomática

As figuras (4.88) e (4.89) mostram os resultados do modelo ISBA-A-gs para a condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 em comparação com dados medidos de fluxo de CO_2 , em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008. Os resultados estão resumidos na tabela (4.11).

Novamente a respiração celular realizada no período noturno pode ser vista na figura (4.89) devido à utilização do módulo A-gs acoplado ao modelo ISBA. Nota-se também na tabela (4.11) o valor mínimo negativo para a assimilação líquida de CO_2

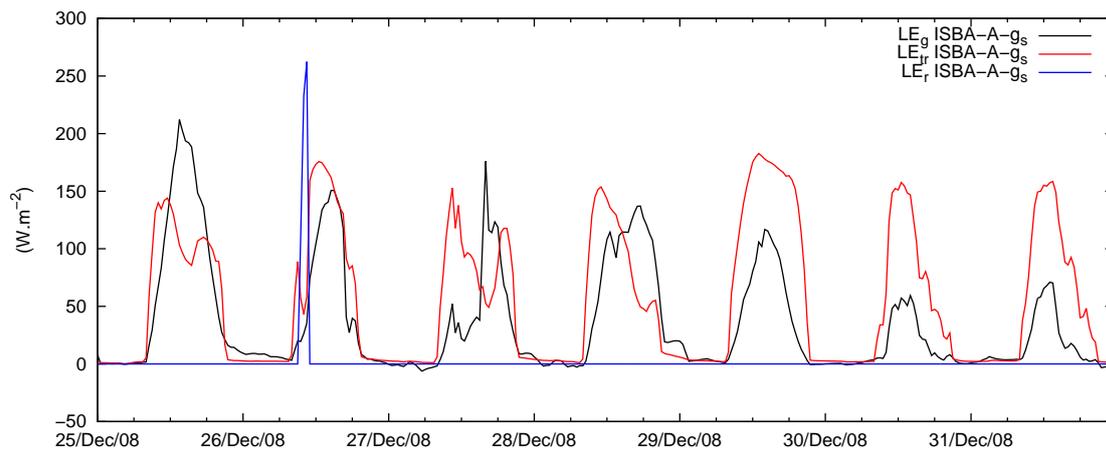


Figura 4.87: Fluxos de calor latente direto do solo (LE_g), calor latente da transpiração (LE_{tr}) e calor latente direto sobre a superfície vegetal (LE_r) calculados com o ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

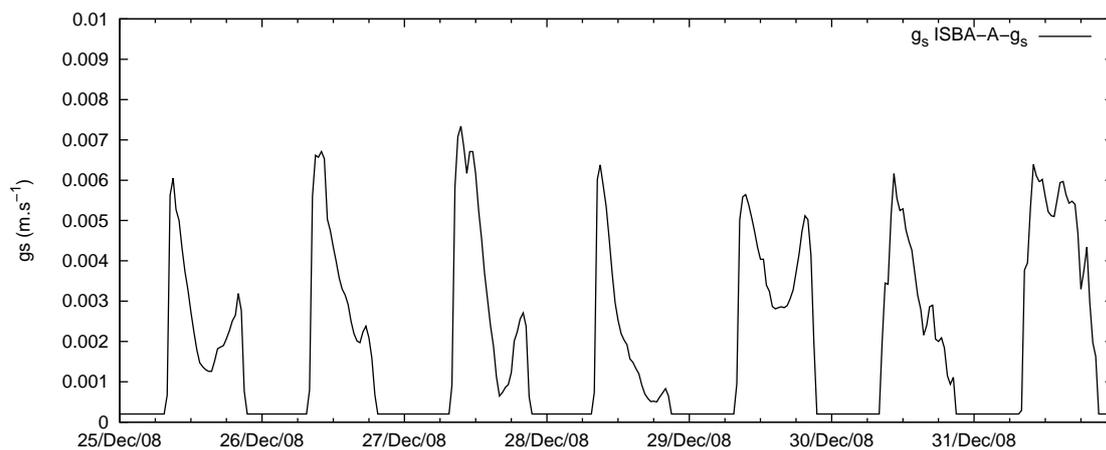


Figura 4.88: Condutância estomática de vapor d'água (g_s) calculada pelo ISBA-A-gs em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

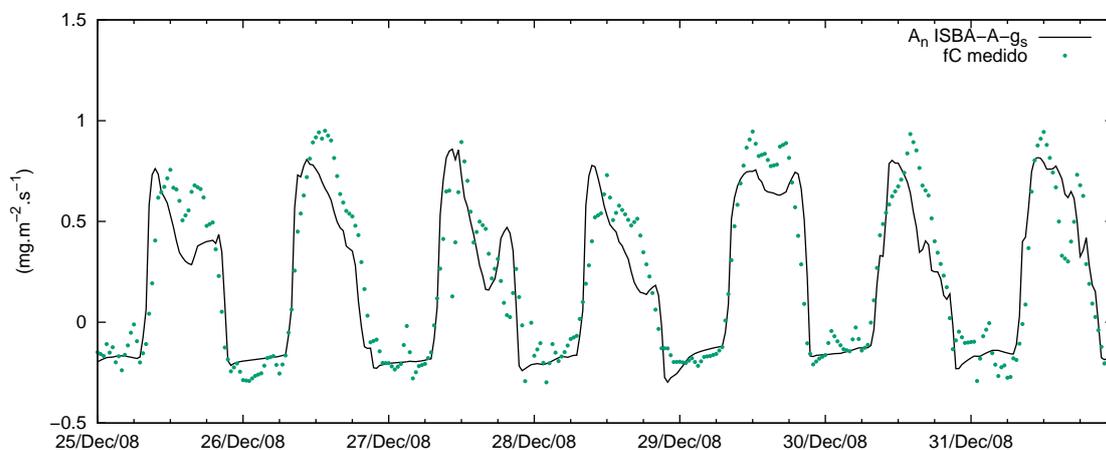


Figura 4.89: Fluxos de carbono calculado pelo ISBA-A-gs (A_n) e medido (fC) em CMAYO entre os dias 25 e 31 de dezembro de 2008.

ISBA-A-gs Argentina 2008				
Variável	Unidade	Média	Máxima	Mínima
Condutância estomática	m s^{-1}	0,00203	0,01013	0,00020
Assimilação líquida de CO_2	$\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0,19904	0,90767	-0,29756

Tabela 4.11: Análises da condutância estomática de vapor de água (g_s) e assimilação líquida de CO_2 (A_n), calculadas em CMAYO entre os dias 23 e 31 de dezembro de 2008.

referente à respiração noturna. Embora este resultado precise ser confirmado por mais dados, o modelo ISBA-A-gs mostra-se bastante promissor para o cálculo do balanço de CO_2 entre a cultura e a atmosfera.

4.3 Resumo e discussão dos resultados

Os modelos de transferência entre solo, vegetação e atmosfera ISBA-gs e ISBA-A-gs, utilizados nesta pesquisa fornecem uma ferramenta para o cálculo dos fluxos superficiais de calor, radiação líquida, temperaturas e umidades em várias camadas do solo e vegetação, condutância estomática de vapor d'água e fluxos de gás carbônico.

Os estômatos são as estruturas existentes nas folhas das plantas que permitem o fluxo de CO_2 na fotossíntese e respiração e, simultaneamente, permitem a saída de água para a atmosfera (transpiração).

Para o cálculo do fluxo de CO_2 com o modelo SVAT ISBA utilizou-se dois métodos diferentes. No primeiro (ISBA-gs) optou-se por manter a forma original do cálculo da resistência estomática do ISBA original (Noilhan e Planton, 1989) acrescentando-se algumas equações para estimar a assimilação de CO_2 (A_n). Já no segundo método (ISBA-A-gs) sofisticou-se a forma de calcular a resistência estomática.

No modelo ISBA-gs utilizou-se o cálculo da resistência estomática (R_s) como descrito por Jarvis (1976), onde as variáveis do ambiente (praticamente apenas meteorológicas) regem a abertura dos estômatos e conseqüentemente a da evapotranspiração, sendo a assimilação de carbono diagnosticada como uma conseqüência. No modelo ISBA-A-gs foi implementado um método para esse cálculo onde a resposta da assimilação líquida de carbono (A_n) aos fatores ambientais foi modelada como primeiro passo a partir de parâmetros fisiológicos da planta (fotossíntese e respira-

ção), e através do seu valor foi calculada a abertura dos estômatos (g_s), que é então utilizada para diagnosticar a transpiração.

Ao alterar o método para o cálculo da resistência estomática evidenciou-se a necessidade de comparar os dois modelos (ISBA-gs e ISBA-A-gs) de maneira a analisar se a modificação foi benéfica ou não. Após calibrar ambos os modelos verificou-se que o ISBA-A-gs melhorou as estimativas de evapotranspiração em relação ao modelo ISBA-gs.

Ficou evidente uma dificuldade dos modelos no cálculo do fluxo de calor sensível após eventos de precipitação. Smaha (2003) já havia notado que uma das fontes de erro do modelo ISBA é uma possível falha do mesmo em prever sob condições com tempo encoberto.

Fica claro que apesar do caminho ser o mesmo (estômatos) a dinâmica na condutância estomática para os fluxos de vapor de água e CO_2 é complexa, e a estratégia de diferentes plantas ou mesmo da mesma planta em diferentes estágios pode gerar, para condições forçantes idênticas, resultados muito diferentes de balanço de CO_2 e vapor de água.

4.4 Modelagem alternativa da umidade relativa na superfície do solo

Nesta seção é apresentada brevemente os resultados da parametrização alternativa da umidade relativa próxima à superfície (h_u) proposta por Vissotto (2003) no sítio experimental de SLOU, onde houve uma melhora significativa na previsão de fluxos de calor latente e sensível. Nas simulações realizadas em CMAYO, verificou-se que os melhores resultados foram obtidos com a utilização do método original do modelo ISBA (equação 3.30). Isto não é surpreendente já que a técnica proposta por Vissotto (2003) usa dados medidos que não estavam disponíveis em CMAYO para fazer regressões, e simplesmente para esse sítio testou-se os coeficientes das regressões feitas para SLOU. Como os resultados para CMAYO foram ruins, as simulações com h_u calculados por Vissotto (2003) foram totalmente descartadas e sequer estão apresentadas neste trabalho.

As figuras (4.90)–(4.93) mostram os resultados de h_u calculados nos modelos

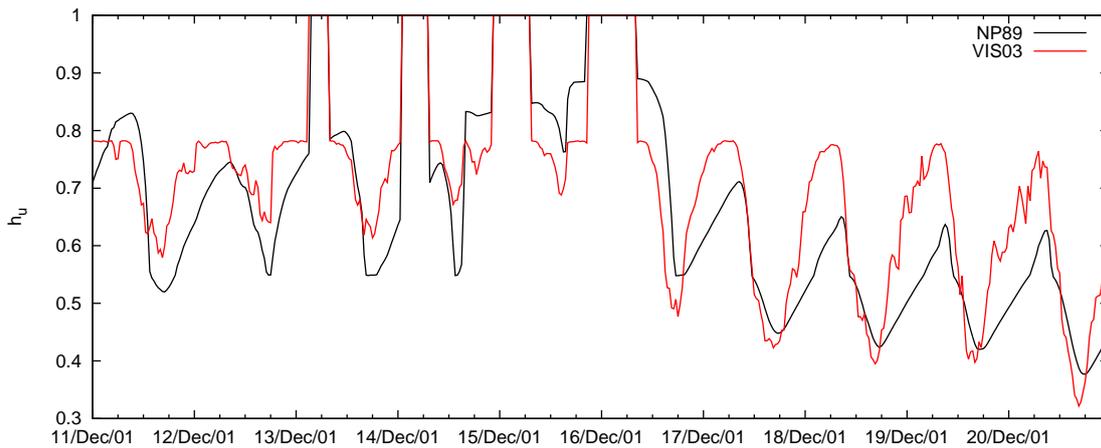


Figura 4.90: Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-gs através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.

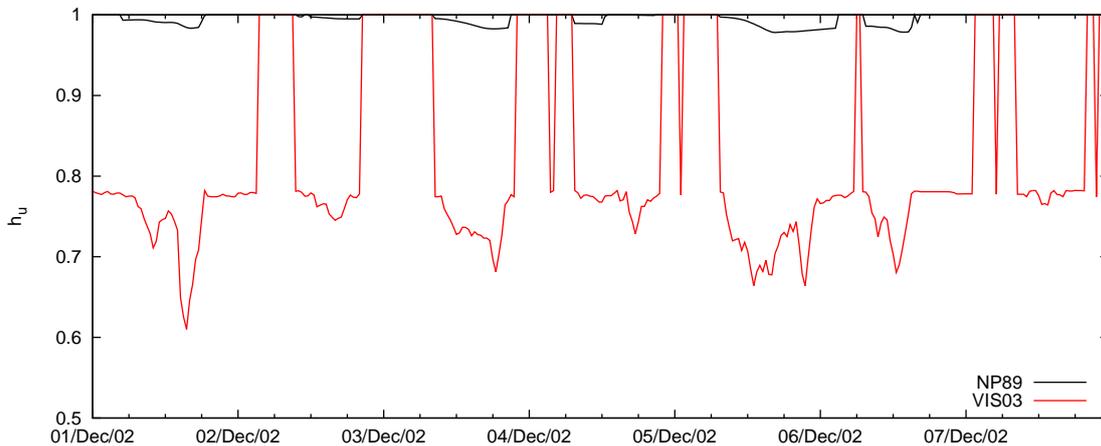


Figura 4.91: Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-gs através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.

ISBA-gs e ISBA-A-gs através das abordagens NP89 de Noilhan e Planton (1989) e VIS03 de Vissotto (2003) em SLOU.

As figuras (4.94)–(4.97) mostram os resultados de fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE) calculados com o modelo ISBA-gs utilizando NP89 e VIS03 em comparação com valores medidos em SLOU.

É possível perceber que a utilização da equação (3.32) para o cálculo da h_u no ISBA-gs melhorou o cálculo do fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível em relação aos resultados da modelagem utilizando a equação (3.30).

Similarmente ao caso do ISBA-gs acima, as figuras (4.98)–(4.101) mostram os resultados de fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE) calculadas

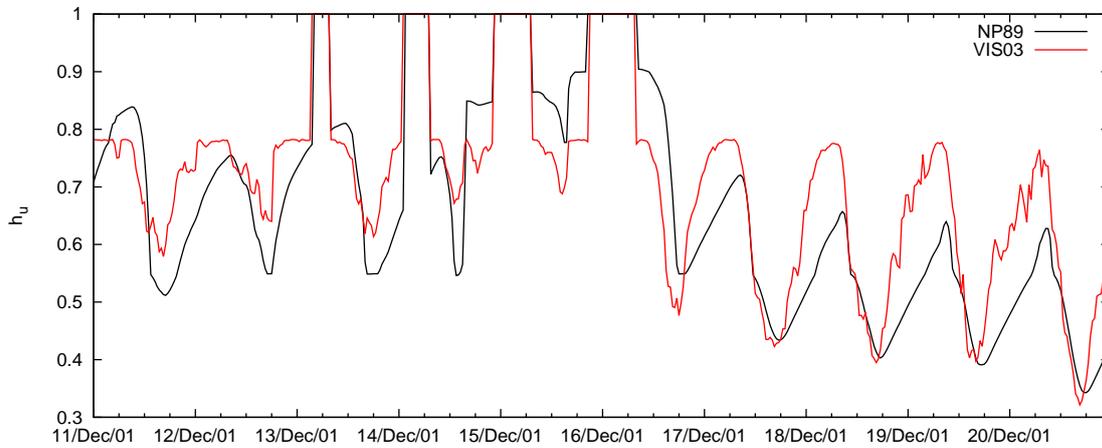


Figura 4.92: Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-Ags através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.

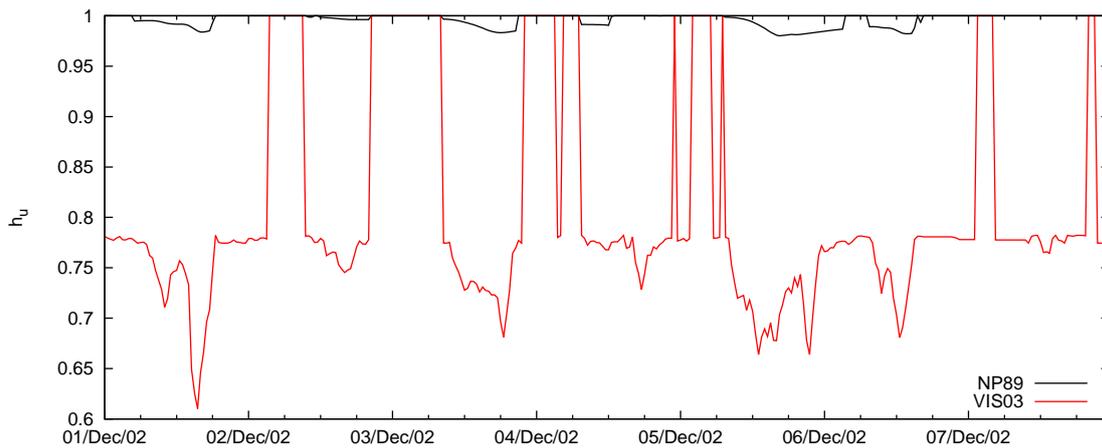


Figura 4.93: Umidade relativa próxima ao solo (h_u) estimada no modelo ISBA-Ags através das abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em SLOU.

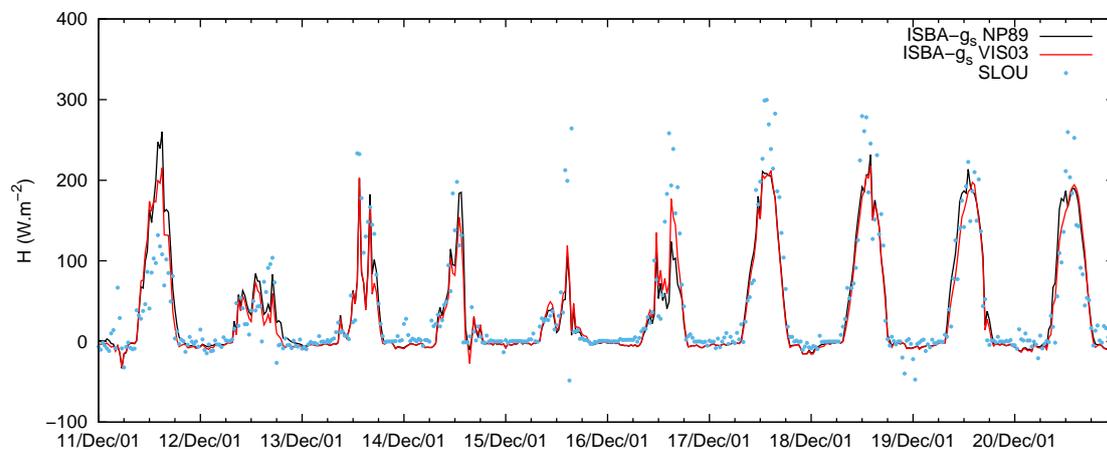


Figura 4.94: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

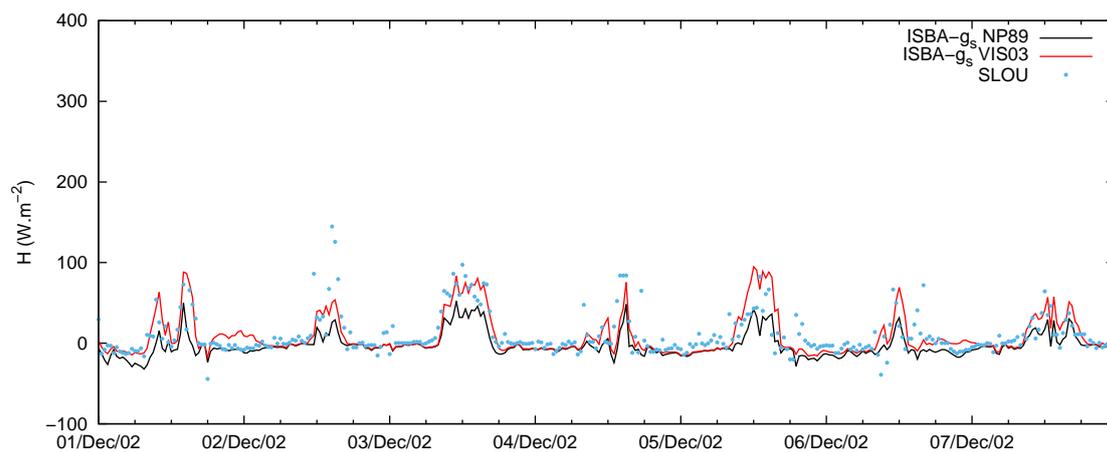


Figura 4.95: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

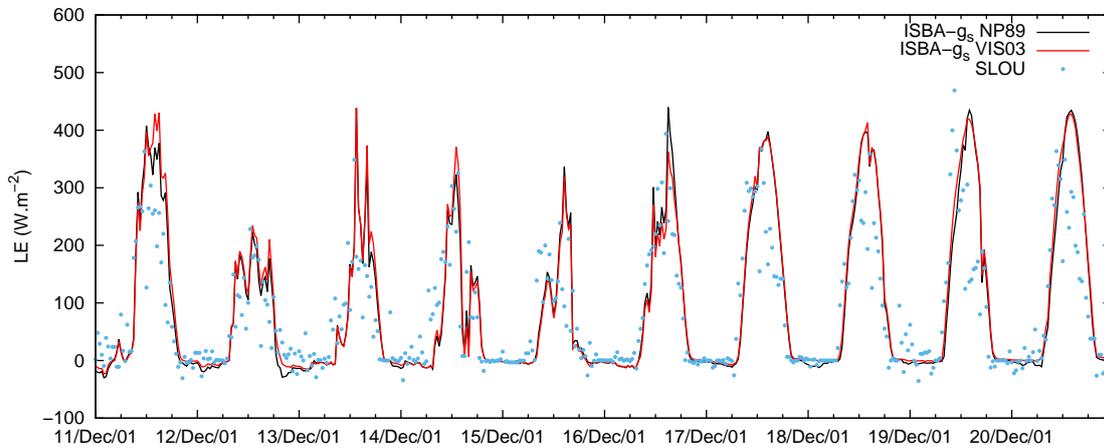


Figura 4.96: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

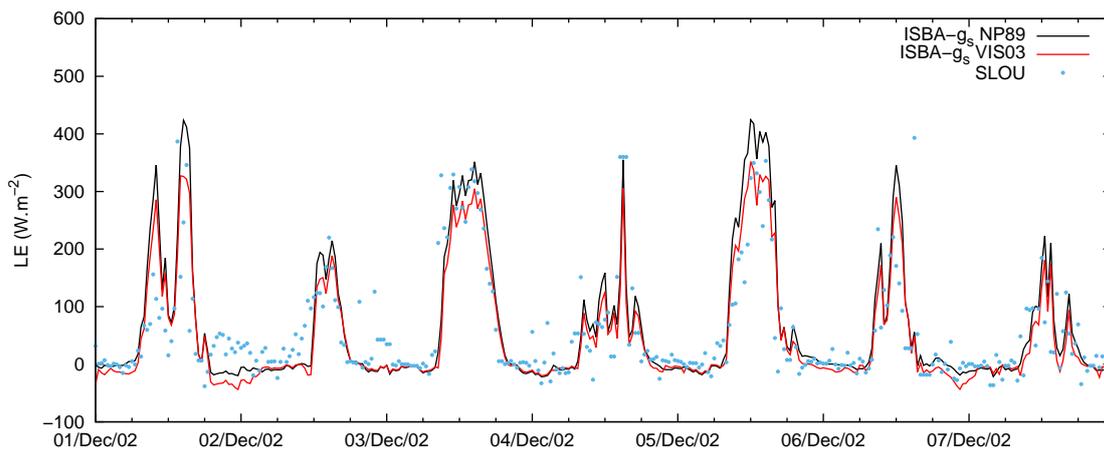


Figura 4.97: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

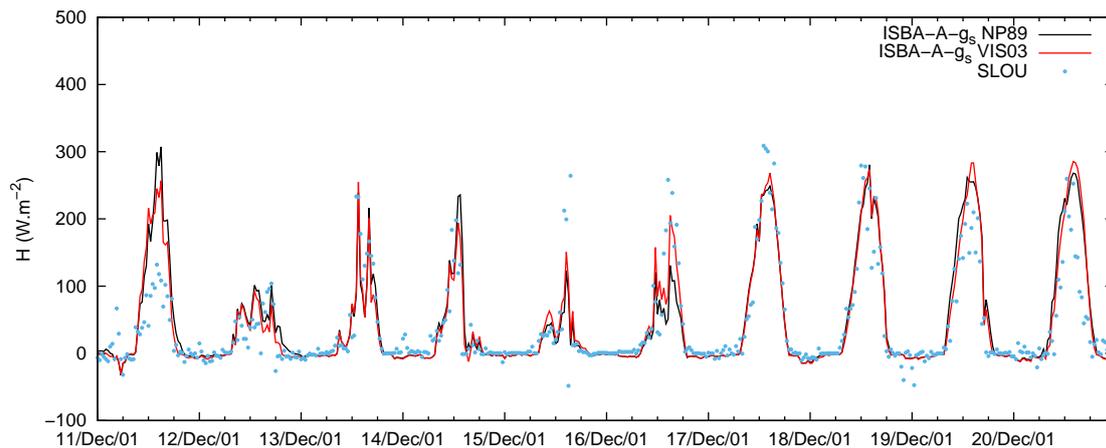


Figura 4.98: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

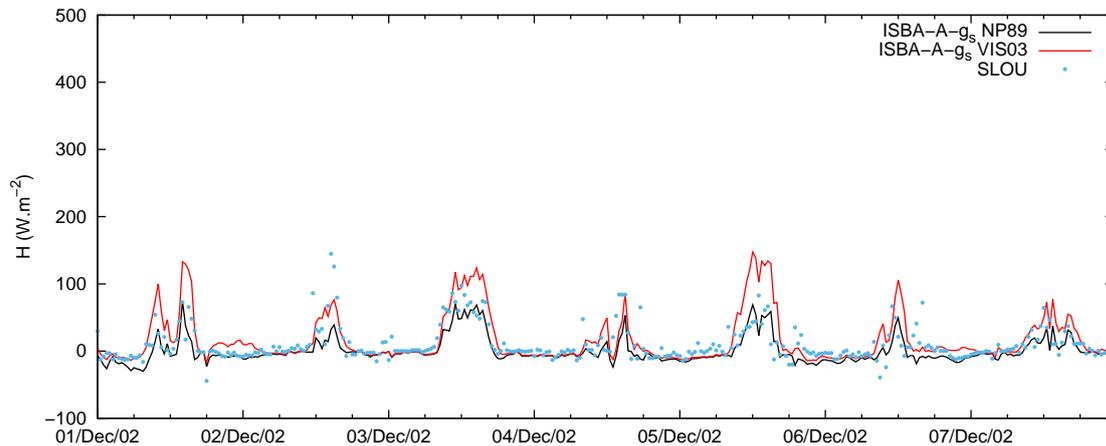


Figura 4.99: Fluxo de calor sensível (H) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

com o modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens NP89 e VIS03 em comparação com valores medidos em SLOU. O comportamento dos fluxos para os dois métodos de cálculo da umidade da superfície do solo foi similar ao ISBA-gs já comentado acima.

Analisando-se a raiz quadrada do erro quadrático médio das previsões para radiação líquida, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente, concluiu-se que a utilização da equação (3.31) proporcionou uma melhoria em relação à equação (3.30) nas modelagens ISBA-gs e ISBA-A-gs para as duas safras de soja (2001 e 2002), embora o ganho tenha sido maior em 2002, o que é razoável devido ao fato desse ano ter sido mais chuvoso do que o ano de 2001.

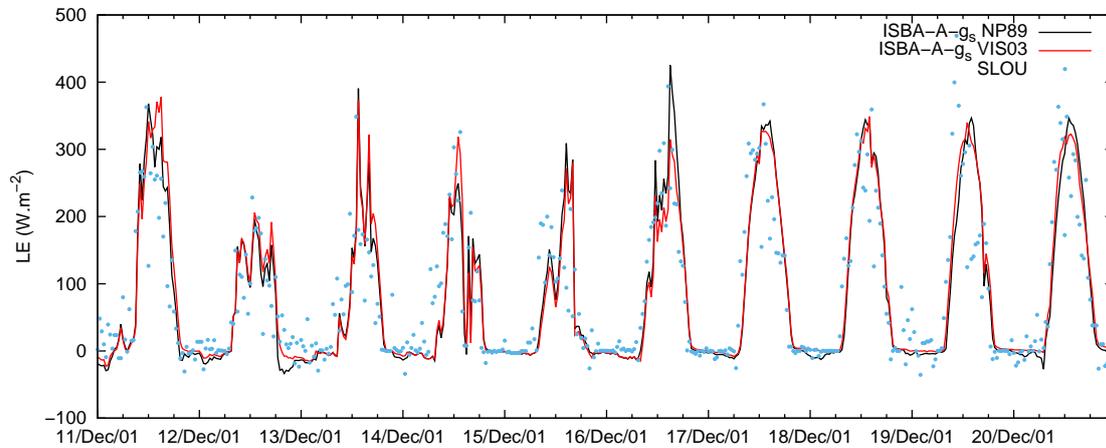


Figura 4.100: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

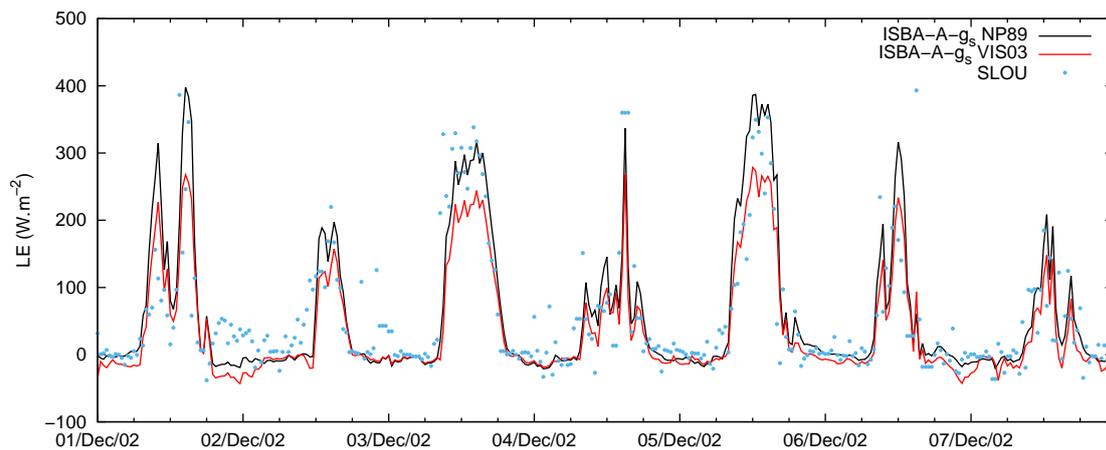


Figura 4.101: Fluxo de calor latente (LE) estimado pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Noilhan e Planton (1989) (NP89) e Vissotto (2003) (VIS03) em comparação com valores medidos em SLOU.

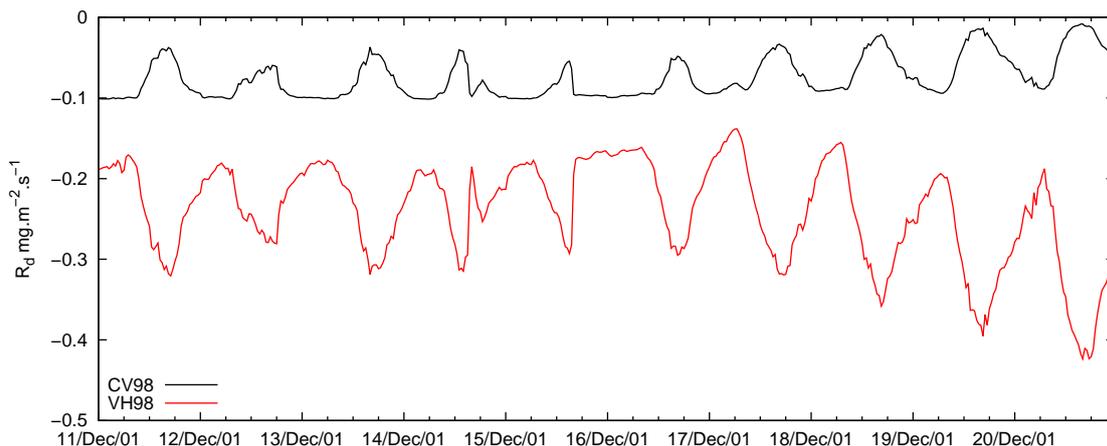


Figura 4.102: R_d estimada pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens para o cálculo original de Calvet et al. (1998) (CV98) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em SLOU.

4.5 Aperfeiçoamento da respiração

Nesta seção são apresentados resultados da respiração (R_d) no modelo ISBA-A-gs segundo à abordagem de Jacobs (1994) (equação 3.75) em comparação com um método de cálculo para essa variável implementado nessa dissertação (equação 3.72). No sítio experimental SLOU verificou-se que a nova metodologia implementada melhorou a previsão dos fluxos de calor sensível e calor latente durante os períodos estudados em 2001 e 2002. A nova formulação também previu com maior acurácia a radiação líquida e o fluxo de calor no solo para o ano de 2001, mas isso não ocorreu no ano de 2002.

As figuras (4.102) e (4.103) mostram os resultados de respiração calculada no modelo ISBA-A-gs com as abordagens de Jacobs (1994) (JC94), usada nos simulações mostradas até este ponto, em comparação com o método de cálculo para essa variável desenvolvido nessa dissertação (denominado VH98) em SLOU. Percebe-se um comportamento anormal da R_d calculada segundo JC94 onde a mesma diminui perto do meio dia pelo fato de ser parametrizada como uma fração da taxa de fotossíntese em condições de saturação de luz (A_m), devido ao fato de A_m diminuir nesse período do dia como consequência de altas temperaturas. Fisiologicamente a respiração tende a aumentar com o aumento da temperatura.

Nas simulações realizadas no sítio experimental em CMAYO província de Buenos Aires na Argentina durante a safra de soja do ano de 2008, verificaram-se que a nova

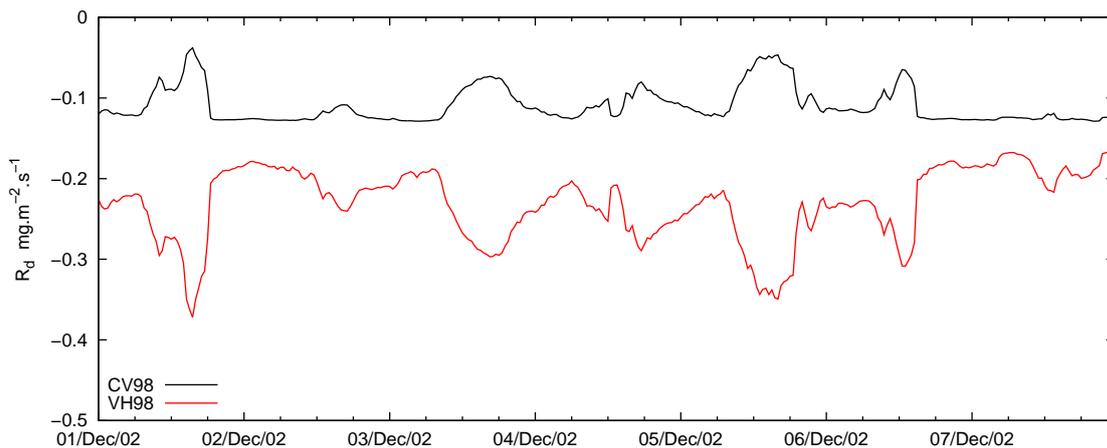


Figura 4.103: R_d estimada pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens para o cálculo original de Calvet et al. (1998) (CV98) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em SLOU.

formulação para o cálculo da R_d melhorou a estimativa do fluxo de CO_2 porém o mesmo não ocorreu para a estimativa da radiação líquida.

É mostrado na figura (4.104) o fluxo de CO_2 calculado com o modelo ISBA-A-gs utilizando a abordagem de Jacobs (1994) e implementadas no ISBA-A-gs por Calvet et al. (1998) (CV98) e a abordagem proposta neste trabalho (VH98), ambas em comparação com valores medidos em CMAYO.

Nas simulações realizadas em CMAYO que visaram principalmente o cálculo do fluxo de CO_2 , verificou-se diretamente através de valores de medição que melhores resultados do cálculo da respiração (R_d) foram obtidos com a utilização do método proposto nessa dissertação (seção 3.2.1). Para se chegar a essa conclusão foi necessário separar dos valores medidos do fluxo de CO_2 em CMAYO as parcelas referentes à fotossíntese e à respiração. Isso foi possível analisando-se os dados do fluxo de CO_2 correspondentes a períodos em que a radiação fotossinteticamente ativa é nula, pois nesses casos não ocorre fotossíntese sendo todo o fluxo proveniente da respiração.

A figura (4.105) mostra o resultado da respiração R_d calculada no modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens para o cálculo original de Calvet et al. (1998) (CV98) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em comparação com valores medidos em CMAYO.

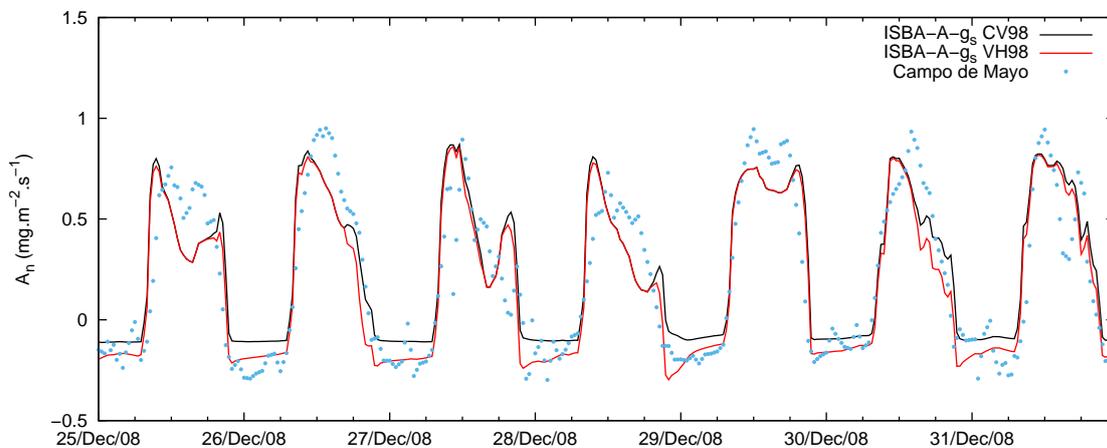


Figura 4.104: Assimilação líquida de CO₂ (A_n) estimada pelo modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens para o cálculo da R_d original de Calvet et al. (1998) (CV98) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em comparação com valores medidos em CMAYO.

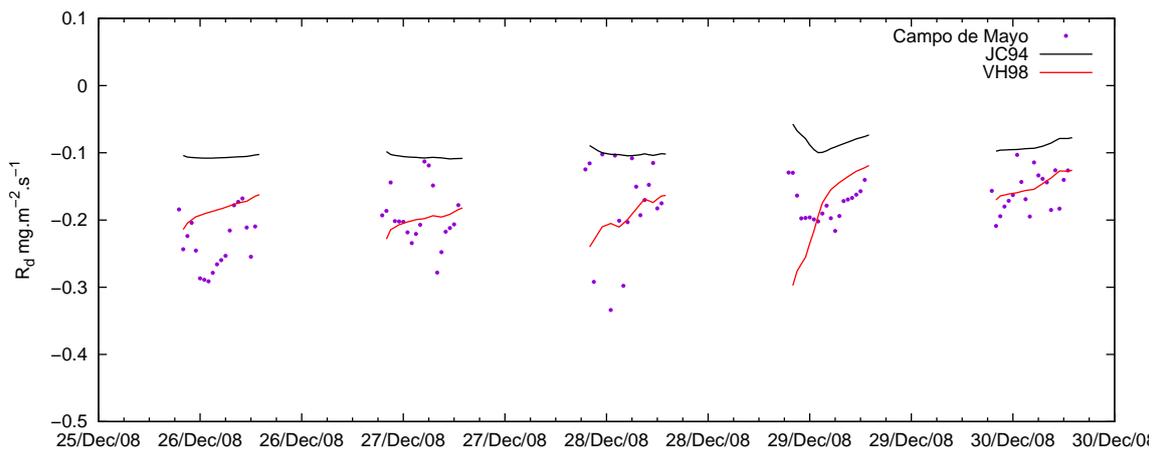


Figura 4.105: respiração (R_d) estimada no modelo ISBA-A-gs utilizando as abordagens de Jacobs (1994) (JC94) e com a formulação implementada nessa dissertação (VH98) em comparação com valores medidos em CMAYO.

Capítulo 5

Conclusões

Os modelos de transferência entre solo, vegetação e atmosfera ISBA-gs e ISBA-A-gs, fornecem uma ferramenta para o cálculo dos fluxos superficiais de calor e vapor d'água, radiação líquida, temperaturas e umidades em várias camadas do solo e vegetação, condutância estomática para fluxo de água e de CO₂.

No primeiro (ISBA-gs) manteve-se a forma original do cálculo da resistência estomática do ISBA (Noilhan e Planton, 1989) acrescentando algumas equações para computar a assimilação líquida de CO₂ (A_n), já no segundo método (ISBA-A-gs) sofisticou-se a maneira de calcular a resistência estomática.

Buscou-se calibrar os dois modelos para que representassem diferentes condições sem a necessidade de recalibração para condições específicas, valendo-se de um experimento de campo complexo e robusto no oeste do Paraná (SLOU) em dois anos consecutivos.

Verificou-se durante a calibração que cada modelo possuiu uma configuração ótima diferente com relação às alturas das camadas de solo e que a camada que compreende a zona de raízes da vegetação exerceu grande influência sobre a modelagem.

Após calibrar os dois modelos para o sítio experimental no oeste do Paraná, verificou-se que o ISBA-A-gs ($REQM = 77,7158 \text{ W m}^{-2}$ para a variável LE em 2001 e $REQM = 71,2358 \text{ W m}^{-2}$ para a variável LE em 2002) melhorou as estimativas de evapotranspiração em relação ao modelo ISBA-gs ($REQM = 83,4253 \text{ W m}^{-2}$ para a variável LE em 2001 e $REQM = 72,8579 \text{ W m}^{-2}$ para a variável LE em 2002).

Evidenciou-se a dificuldade dos modelos no cálculo do fluxo de calor sensível

após eventos de precipitação. O ISBA-A-gs apresentou $REQM = 55,2738 \text{ W m}^{-2}$ para a variável H em 2001 e $REQM = 70,5944 \text{ W m}^{-2}$ para a variável H em 2002. O modelo ISBA-gs apresentou $REQM = 51,0478 \text{ W m}^{-2}$ para a variável H em 2001 e $REQM = 72,9471 \text{ W m}^{-2}$ para a variável H em 2002. Lembrando que o mês de estudo (dezembro) em 2002 esteve sujeito a maiores taxas de precipitação do que o mesmo período (dezembro) do ano anterior.

Ambos os modelos em SLOU apresentaram maior acurácia em situações com maior radiação incidente e menos chuva para as variáveis G e H , e em condições de menor radiação incidente e maior precipitação para as variáveis R_n e LE .

Comparando os dois modelos para a média das quatro variáveis analisadas nos dois anos de estudo conclui-se que o ISBA-A-gs ($REQM = 74,2735 \text{ W m}^{-2}$) produziu simulações com maior acurácia em relação ao ISBA-gs ($REQM = 74,4527 \text{ W m}^{-2}$). Fazendo a análise para a média das quatro variáveis nos anos de 2001 e 2002 individualmente o ISBA-A-gs mostrou mais acurácia em ambos os anos, ($REQM = 77,3112 \text{ W m}^{-2}$) contra ($REQM = 77,4455 \text{ W m}^{-2}$) em 2001 e ($REQM = 71,2358 \text{ W m}^{-2}$) contra ($REQM = 71,4599 \text{ W m}^{-2}$) em 2002.

Analisando individualmente a média para cada variável estudada nos dois anos verificou-se que o ISBA-gs representou com mais acurácia G ($REQM = 28,2035 \text{ W m}^{-2}$ contra $REQM = 30,87503 \text{ W m}^{-2}$) e H ($REQM = 61,9974 \text{ W m}^{-2}$ contra $REQM = 62,93413 \text{ W m}^{-2}$), enquanto que R_n ($REQM = 129,0747 \text{ W m}^{-2}$ contra $REQM = 129,4681 \text{ W m}^{-2}$) e LE ($REQM = 74,2101 \text{ W m}^{-2}$ contra $REQM = 78,1416 \text{ W m}^{-2}$) foram melhor estimados pelo ISBA-A-gs.

Os modelos calibrados em SLOU no Paraná foram utilizados para calcular o fluxo de CO_2 em uma plantação de soja em Campo de Mayo na Argentina (CMAYO), onde foram coletados dados de fluxo de CO_2 experimentalmente.

Analisando a raiz quadrada do erro quadrático médio para R_n que das variáveis utilizadas na calibração dos modelos em SLOU, foi a única disponível em CMAYO, concluiu-se que os modelos calibrados em SLOU realizaram previsões com qualidade em Campo de Mayo, e que o ISBA-A-gs ($REQM = 139,1827 \text{ W m}^{-2}$) teve melhor desempenho na previsão da R_n do que o ISBA-gs ($REQM = 140,0128 \text{ W m}^{-2}$).

Verificou-se também que o ISBA-A-gs superestimou a radiação líquida, porém se mostrou imparcial no cálculo da assimilação líquida de CO_2 , já o ISBA-gs supe-

restimou ambas.

Com relação à radiação líquida os modelos responderam em coerência com as simulações em SLOU, visto que em SLOU a radiação líquida foi superestimada em 2001 (safra de soja sujeita a maior radiação e menor precipitação) e subestimada em 2002 (safra de soja sujeita a menor radiação e maior precipitação) por ambos os modelos, isto posto que a safra em estudo em CMAYO no ano de 2008 esteve exposta a condições climáticas similares as do ano de 2001 em SLOU.

Analisando os modelos com relação à assimilação líquida de CO_2 em CMAYO conclui-se que o modelo ISBA-A-gs estimou com qualidade o fluxo de CO_2 quando comparado com valores medidos. Os fluxos de CO_2 máximos foram registrados antes do meio-dia o que tem relação com a radiação incidente e valores do déficit de pressão do vapor neste horário. O valor máximo medido foi de aproximadamente $1,0 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sendo que o valor máximo desta calculado foi de $0,90767 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

5.1 Recomendações

Um dos temas de pesquisas atuais é a variabilidade sazonal e interanual da vegetação que por sua vez interage com os processos hidrológicos. Em regiões suscetíveis a variações climáticas sazonais tais como estiagens, a umidade no solo gera grande impacto sobre o crescimento das plantas e a maneira como é representada a ascensão de água através da raiz é importante pois deve influenciar na quantidade de biomassa abaixo e acima da superfície, em particular nos valores máximos alcançados em cada safra (Canal et al., 2014).

Na versão do ISBA-A-gs com módulo para o crescimento vegetal de Calvet et al. (2012) a fenologia da planta é governada pela fotossíntese e o crescimento ocorre pelo acúmulo de carbono da assimilação líquida. Os valores máximos simulados pelo módulo de crescimento vegetal para a biomassa abaixo do solo e para o IAF podem sofrer diferenças anuais devido aos impactos sofridos pela fotossíntese como consequência da variabilidade do tempo e clima (Canal et al., 2014).

Sugere-se portanto como recomendação, a inserção de um módulo para o cálculo do crescimento e evolução vegetal no modelo ISBA-A-gs apresentado nesta dissertação através da inclusão de uma equação prognóstica para o IAF . Também

recomenda-se a obtenção de dados de experimentos de campo sobre a fenologia da soja e de outras culturas, para que a eficiência do módulo de crescimento proposto possa ser melhor parametrizada e avaliada.

Apêndice A

Análises estatísticas dos modelos em SLOU

Para análise dos fluxos prognósticos em relação aos valores medidos, em cada cenário (tabela 4.5), foram calculados; o erro médio (EM), erro quadrático médio (EQM), desvio médio absoluto (DMA) e raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$).

A.1 ISBA- g_s

Nas tabelas (A.1)–(A.4) são apresentados em detalhes, os valores das análises estatísticas realizadas nos anos de 2001 e 2002, para cada variável de estudo.

A.2 ISBA-A- g_s

Nas tabelas (A.5)–(A.8) são apresentados em detalhes, os valores das análises estatísticas realizadas nos anos de 2001 e 2002, para cada variável de estudo.

$R_n(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2001.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	58.42694	22233.81479	91.20107	149.11008
2	58.81677	22382.18964	91.42552	149.60678
3	58.42042	22293.63623	91.26108	149.31054
4	58.81677	22382.18964	91.42552	149.60678
5	56.66868	21893.02112	90.56976	147.9629
6	56.27206	21800.61538	90.39884	147.65031
7	54.14121	21307.19726	89.63650	145.96985
8	52.86298	21178.04682	89.66389	145.52679
$R_n(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2002.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	-58.74204	11965.64777	69.62773	109.3876
2	-58.40943	11888.17762	69.44044	109.03292
3	-58.50339	11912.79026	69.51004	109.14573
4	-58.40943	11888.17762	69.44044	109.03292
5	-60.23334	12315.09563	70.66534	110.9734
6	-60.07117	12277.95363	70.57491	110.80593
7	-62.96278	12923.45883	72.10155	113.68139
8	-63.59245	12931.15949	72.21032	113.71526

Tabela A.1: Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g_s em SLOU.

$G(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2001.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	-0.08192	802.62788	18.23136	28.33069
2	-0.02501	736.88255	17.76084	27.14558
3	-0.00532	739.36777	17.63170	27.19132
4	-0.02501	736.88255	17.76084	27.14558
5	-0.00822	747.79775	17.05522	27.34589
6	0.04361	751.35049	16.85774	27.41077
7	0.00478	792.88353	16.44614	28.15819
8	-0.08048	895.12046	17.90389	29.91856
$G(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2002.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	-4.72143	695.11246	16.81311	26.36499
2	-4.76162	689.24981	16.72872	26.25357
3	-4.76005	698.61582	16.72534	26.43134
4	-4.76162	689.24981	16.72872	26.25357
5	-4.70799	844.54589	16.38464	29.06107
6	-4.70618	838.76153	16.42550	28.96138
7	-4.64975	932.51246	16.23492	30.53707
8	-4.61279	1007.60814	16.80689	31.74284

Tabela A.2: Análise estatística do fluxo de calor no solo (G) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA- g_s em SLOU.

$H(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2001.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	-8.28028	2552.03949	26.40789	50.51771
2	-9.58424	2597.87299	26.50267	50.96933
3	-8.03049	2609.50224	26.58326	51.08329
4	-9.58424	2597.87299	26.50267	50.96933
5	-0.41300	2605.87651	27.59651	51.04779
6	1.43893	2709.37209	28.30783	52.05163
7	11.49051	3243.84259	32.16552	56.95474
8	15.14395	3597.12519	34.23712	59.97604
$H(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2002.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	-33.84484	5418.33876	36.75589	73.60937
2	-34.79749	5543.12350	37.36350	74.45216
3	-34.56166	5523.78028	37.28755	74.32214
4	-34.79749	5543.12350	37.36350	74.45216
5	-29.89469	5321.27941	37.19287	72.94710
6	-30.37215	5330.16756	37.15549	73.00800
7	-21.45767	4594.19541	35.07029	67.78049
8	-21.03815	4569.60446	34.96668	67.59885

Tabela A.3: Análise estatística do fluxo de calor sensível (H) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g_s em SLOU.

<i>LE</i> (W m ⁻²), dezembro de 2001.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	10.43770	7398.19104	54.09709	86.01274
2	12.07457	7777.50428	55.30429	88.19016
3	10.10479	7661.46207	55.00294	87.52978
4	12.07457	7777.50428	55.30429	88.19016
5	0.73846	6959.79159	52.93906	83.42537
6	-1.56193	6921.39048	52.96182	83.19489
7	-13.70553	6603.62208	52.28755	81.26267
8	-18.55195	6792.95700	52.95973	82.41940
<i>LE</i> (W m ⁻²), dezembro de 2002.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	18.05265	5994.98842	45.88858	77.42731
2	19.37810	6190.73960	46.72467	78.68125
3	19.04676	6142.18672	46.53916	78.37210
4	19.37810	6190.73960	46.72467	78.68125
5	12.59777	5308.26876	43.19313	72.85787
6	13.23559	5398.47421	43.53767	73.47431
7	1.37306	4670.04446	40.51263	68.33772
8	0.28692	4603.64993	40.15820	67.85020

Tabela A.4: Análise estatística do fluxo de calor latente (*LE*) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-g_s em SLOU.

$R_n(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2001.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	55.54904	21477.03309	89.98505	146.55045
2	56.00579	21640.91653	90.25924	147.10852
3	55.82884	21602.28233	90.18717	146.97715
4	54.69331	21374.52967	89.80298	146.20031
5	54.19179	21285.54462	89.66355	145.89566
6	53.80311	21199.16253	89.51700	145.59932
7	52.11264	20819.34398	88.95458	144.28910
8	52.86298	21178.04682	89.66389	145.52679
$R_n(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2002.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	-60.72289	13842.18574	73.85816	117.65282
2	-60.35917	12254.47427	70.44398	110.69993
3	-60.33693	12249.41576	70.42610	110.67708
4	-61.55255	12532.60275	71.33588	111.94911
5	-62.60445	12786.68713	71.92443	113.07823
6	-62.54952	12774.07968	71.89578	113.02247
7	-65.08672	13346.71493	73.28528	115.52798
8	-63.58628	14383.84482	75.18951	119.93267

Tabela A.5: Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.

$G(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2001.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	0.11083	970.54544	20.39319	31.15358
2	0.15975	924.15370	19.74719	30.39990
3	0.18725	923.25281	19.61963	30.38508
4	0.16691	903.27951	18.91862	30.05461
5	0.12295	901.61440	18.69347	30.02689
6	0.15476	901.50210	18.39770	30.02502
7	0.07301	924.32738	17.56239	30.40275
8	-0.08048	895.12046	17.90389	29.91856
$G(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2002.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	-4.52048	689.16884	15.69397	26.25203
2	-4.54223	813.99450	17.19592	28.53059
3	-4.55175	817.74637	17.22052	28.59626
4	-4.54137	1004.60118	16.92687	31.69544
5	-4.58420	1163.07240	16.78698	34.10385
6	-4.58666	1162.20411	16.77385	34.09111
7	-4.53274	1113.02721	16.46583	33.36206
8	-4.61992	864.01271	15.15622	29.39409

Tabela A.6: Análise estatística do fluxo de calor no solo (G) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.

$H(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2001.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	3.55565	2826.31522	28.57510	53.16310
2	1.84251	2698.90835	28.08988	51.95102
3	2.67623	2763.15538	28.44607	52.56572
4	8.16454	3055.19836	30.33856	55.27385
5	10.52525	3190.76513	31.19975	56.48686
6	12.50189	3386.14789	32.24603	58.19062
7	21.30231	4302.39850	36.98329	65.59267
8	15.14395	3597.12519	34.23712	59.97604
$H(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2002.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	-29.30887	4880.91671	34.99839	69.86356
2	-30.41229	4967.46830	34.89259	70.48027
3	-30.47623	4975.44528	34.91474	70.53684
4	-27.02087	4983.57072	35.71616	70.59441
5	-23.57891	4960.24550	35.69987	70.42901
6	-23.74993	4961.34203	35.69817	70.43679
7	-14.95068	4232.18117	34.26149	65.05522
8	-21.03593	4636.63619	35.36314	68.09285

Tabela A.7: Análise estatística do fluxo de calor sensível (H) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.

$LE(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2001.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	-4.46889	5853.17729	48.15364	76.50606
2	-2.34791	6053.81457	49.15207	77.80626
3	-3.38608	6073.14390	49.18121	77.93038
4	-9.98958	6039.75307	49.21258	77.71585
5	-12.80786	6061.87045	49.43461	77.85801
6	-15.20498	6143.35568	49.78015	78.37956
7	-25.61413	6523.11710	50.99697	80.76582
8	-18.55195	6792.95700	52.95973	82.41940
$LE(\text{W m}^{-2})$, dezembro de 2002.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	11.33489	5554.14580	43.79390	74.52614
2	12.82377	5313.18439	42.98302	72.89159
3	12.91948	5328.80145	43.04154	72.99864
4	8.23812	4999.09896	41.35008	70.70431
5	3.78709	4822.65343	40.13753	69.44533
6	4.01550	4822.18912	40.13783	69.44198
7	-7.37486	4585.37578	39.52982	67.71540
8	0.29799	5103.15350	42.09342	71.43636

Tabela A.8: Análise estatística do fluxo de calor latente (LE) prognóstico e medido, dos anos de 2001 e 2002, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs em SLOU.

Apêndice B

Análises estatísticas dos modelos na Argentina

Na tabela (B.1) é descrito os vários cenários propostos, com relação as alturas das camadas nos modelos.

Para análise dos fluxos prognósticos em relação aos valores medidos, em cada cenário (tabela B.1), foram calculados; o erro médio (EM), erro quadrático médio (EQM), desvio médio absoluto (DMA) e raiz quadrada do erro quadrático médio ($REQM$).

B.1 ISBA-g_s

Nas tabelas (B.2) e (B.3) são apresentados em detalhes, os valores das análises estatísticas realizadas com os dados no período de 23–31 de dezembro de 2008, para cada variável de estudo.

B.2 ISBA-A-g_s

Nas tabelas (B.4) e (B.5) são apresentados em detalhes, os valores das análises estatísticas realizadas com os dados no período de 23–31 de dezembro de 2008, para cada variável de estudo.

Cenário	Unidade	d_2	d_3	d_r
1	m	1.20	3.00	1.00
3	m	1.20	3.00	0.50
4	m	1.20	2.50	0.50
5	m	1.20	1.60	1.00
6	m	1.20	1.60	0.50
7	m	1.20	1.00	1.00
8	m	1.20	0.50	1.00
9	m	1.00	2.50	0.50
10	m	1.00	1.60	1.00
11	m	1.00	1.60	1.00
12	m	1.00	1.60	0.50
13	m	1.00	1.10	1.00
15	m	0.85	2.50	0.50
16	m	0.85	1.60	0.50
17	m	0.50	2.50	0.50
18	m	0.50	1.60	0.50

Tabela B.1: Cenários propostos para as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs na Argentina.

$R_n(\text{W m}^{-2})$, 23–31 de dezembro de 2002.				
Cenário	EM	EQM	DMA	$REQM$
1	25.4297	19657.9674	84.5765	140.2069
2	25.4282	19658.6405	84.5426	140.2093
3	25.4297	19657.9674	84.5765	140.2069
4	25.4271	19657.6725	84.5756	140.2058
5	25.4348	19658.5906	84.5784	140.2091
6	25.4348	19658.5906	84.5784	140.2091
7	25.5146	19668.1920	84.6086	140.2433
8	26.1947	19751.7019	84.9030	140.5407
9	25.1299	19629.1671	84.4805	140.1041
10	25.1276	19628.9479	84.4796	140.1033
11	25.1299	19627.3700	84.4433	140.0977
12	25.1276	19628.9479	84.4796	140.1033
13	25.1589	19632.3665	84.4909	140.1155
14	25.1606	19631.1882	84.4548	140.1113
15	24.8247	19603.5943	84.3877	140.0128
16	24.8162	19602.7977	84.3846	140.0100
17	23.9178	19532.3731	84.0139	139.7583
18	23.9171	19531.7211	84.0107	139.7559

Tabela B.2: Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-gs na Argentina.

$A_n(\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1})$, 23–31 de dezembro de 2008.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	0.1248	0.1348	0.2262	0.3671
2	0.1333	0.1365	0.2286	0.3694
3	0.1248	0.1348	0.2262	0.3671
4	0.1247	0.1348	0.2262	0.3671
5	0.1248	0.1348	0.2263	0.3671
6	0.1248	0.1348	0.2263	0.3671
7	0.1258	0.1350	0.2264	0.3674
8	0.1339	0.1365	0.2277	0.3694
9	0.1199	0.1341	0.2249	0.3661
10	0.1198	0.1341	0.2249	0.3661
11	0.1288	0.1356	0.2273	0.3683
12	0.1198	0.1341	0.2249	0.3661
13	0.1202	0.1341	0.2250	0.3662
14	0.1291	0.1357	0.2273	0.3683
15	0.1149	0.1335	0.2241	0.3653
16	0.1148	0.1335	0.2241	0.3653
17	0.0921	0.1323	0.2230	0.3638
18	0.0923	0.1323	0.2230	0.3637

Tabela B.3: Análise estatística do fluxo de CO_2 (A_n) prognóstico e medido, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA- g_s na Argentina.

$R_n(\text{W m}^{-2})$, 23–31 de dezembro de 2002.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	24.4363	19399.3753	83.8522	139.2816
2	24.9025	19499.9395	83.6586	139.9998
3	24.4363	19399.3753	83.8522	139.2816
4	24.4337	19399.0727	83.8512	139.2806
5	24.4414	19399.9994	83.8539	139.2839
6	24.4414	19399.9994	83.8539	139.2839
7	24.5245	19410.3412	83.8834	139.3210
8	25.2307	19508.1867	84.1857	139.6717
9	24.1671	19372.0636	83.7718	139.1836
10	24.1648	19371.8219	83.7709	139.1827
11	24.0516	19355.3462	83.6714	139.1235
12	24.1648	19371.8219	83.7709	139.1827
13	24.1976	19375.4676	83.7820	139.1958
14	24.0845	19359.3034	83.6830	139.1377
15	23.9330	19352.3662	83.6883	139.1128
16	23.9258	19351.7177	83.6847	139.1105
17	23.2481	19298.3288	83.4036	138.9184
18	23.2443	19297.4483	83.3989	138.9153

Tabela B.4: Análise estatística da radiação líquida (R_n) prognóstica e medida, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs na Argentina.

$A_n(\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1})$, 23–31 de dezembro de 2008.				
Cenário	<i>EM</i>	<i>EQM</i>	<i>DMA</i>	<i>REQM</i>
1	0.0059	0.1199	0.1903	0.3462
2	0.0435	0.1235	0.1855	0.3514
3	0.0059	0.1199	0.1903	0.3462
4	0.0059	0.1199	0.1903	0.3462
5	0.0059	0.1199	0.1903	0.3462
6	0.0059	0.1199	0.1903	0.3462
7	0.0066	0.1199	0.1901	0.3463
8	0.0124	0.1200	0.1885	0.3464
9	0.0030	0.1199	0.1910	0.3462
10	0.0030	0.1199	0.1910	0.3462
11	0.0068	0.1201	0.1905	0.3465
12	0.0030	0.1199	0.1910	0.3462
13	0.0033	0.1199	0.1909	0.3462
14	0.0071	0.1201	0.1904	0.3465
15	0.0001	0.1199	0.1917	0.3463
16	0.0001	0.1199	0.1917	0.3463
17	-0.0132	0.1208	0.1958	0.3476
18	-0.0131	0.1208	0.1958	0.3476

Tabela B.5: Análise estatística do fluxo de CO_2 (A_n) prognóstico e medido, no período de 23–31 de dezembro de 2008, com relação as alturas das camadas de solo no modelo ISBA-A-gs na Argentina.

Referências Bibliográficas

- Alapaty, K., Pleim, J. E., Raman, S., Niyogi, D. S., e Byun, D. W. (1997). Simulation of atmospheric boundary layer processes using local-and nonlocal-closure schemes. *Journal of Applied Meteorology*, 36(3):214–233.
- Avissar, R., Avissar, P., Mahrer, Y., e Bravdo, B. A. (1985). A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34(1):21–29.
- Baesso, R. C. E. (2011). *Efeito do CO₂ na eficiência quântica do eucalipto e sua utilização na modelagem de seu crescimento pelo 3-PG*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa.
- Baldocchi, D. (1992). A Lagrangian random-walk model for simulating water vapor, CO₂ and sensible heat flux densities and scalar profiles over and within a soybean canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, 61(1-2):113–144.
- Baldocchi, D. (1994). A comparative study of mass and energy exchange over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67(3):191–220.
- Ball, J. T., Woodrow, I. E., e Berry, J. A. (1987). A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. Em *Progress in photosynthesis research*, páginas 221–224. Springer.
- Berry, J. e Raison, J. (1981). Responses of macrophytes to temperature. Em *Physiological Plant Ecology I*, páginas 277–338. Springer.

- Betts, R. A., Cox, P. M., Lee, S. E., e Woodward, F. I. (1997). Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature*, 387:796–799.
- Beven, K. e Kirkby, M. (1979). A physically based variable contribution area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24:43–69.
- Blad, B. L. e Baker, D. G. (1972). Reflected radiation from a soybean crop. *Agronomy Journal*, 64(3):277–280.
- Boone, A., Calvet, J.-C., e Noilhan, J. (1999). Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force-Restore Method. *J Appl Meteorol*, 38:1611–1630.
- Bosilovich, M. G. e Sun, W.-Y. (1995). Formulation and verification of a land surface parameterization for atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 73(4):321–341.
- Britton, C. e Dodd, J. (1976). Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Agricultural Meteorology*, 17(1):1–7.
- Brut, A., Rudiger, C., Lafont, S., Roujean, J.-L., Calvet, J.-C., Jarlan, L., Gibelin, A.-L., Albergel, C., Le Moigne, P., Soussana, J., et al. (2009). Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs: comparison with satellite-derived LAI over southwestern France. *Biogeosciences*, 6:1389–1404.
- Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., e Bradley, E. F. (1971). Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 28:181–189.
- Calvet, J., Lafont, S., Cloppet, E., Souverain, F., Badeau, V., e Le Bas, C. (2012). Use of agricultural statistics to verify the interannual variability in land surface models: a case study over France with ISBA-A-gs. *Geoscientific Model Development*, 5(1):37–54.
- Calvet, J. C., Noilhan, J., Roujean, J. L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Oliosio, A., e Wigneron, J. P. (1998). An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting Sites. *Agric For Meteorol*, 92:73–95.

- Calvet, J.-C., Rivalland, V., Picon-Cochard, C., e Guehl, J.-M. (2004). Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes-response to soil moisture stress. *Agricultural and forest meteorology*, 124(3):143–156.
- Canal, N., Calvet, J.-C., Decharme, B., Carrer, D., Lafont, S., e Pigeon, G. (2014). Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12):4979–4999.
- Cancelli, D. M. (2003). Implementação de um esquema distribuído de transferência solo-vegetação-atmosfera. Trabalho de conclusão de curso: graduação em engenharia ambiental, UFPR.
- Choudhury, B. e Monteith, J. (1986). Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vegetation. *Agricultural and forest meteorology*, 36(3):215–225.
- Clapp, R. B. e Hornberger, G. M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res*, 14(4):601–604.
- Collatz, G. J., Ball, J. T., Grivet, C., e Berry, J. A. (1991). Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54(2):107–136.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., e Berry, J. (1992). Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Functional Plant Biology*, 19(5):519–538.
- Cox, P., Huntingford, C., e Harding, R. (1998). A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. *Journal of Hydrology*, 212:79–94.
- Ács, F. (1994). A coupled soil-vegetation scheme: Description, parameters, validation, and, sensitivity studies. *Journal of Applied Meteorology*, 33(2):268–284.
- de Assis, F. N. e Mendez, M. E. G. (1989). Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 24(7):797–800.

- De Bruin, H. (1983). A model for the Priestley-Taylor parameter α . *Journal of climate and applied meteorology*, 22(4):572–578.
- de MVBR Leitão, M., dos Santos, J. M., e de Oliveira, G. M. (2002). Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta amazônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6(2):256–261.
- de Souza, P. J. d. O., Ribeiro, A., da Rocha, E. J., Loureiro, R. S., Bispo, C. J., e Sousa, A. M. (2010). Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 14(1):65–73.
- Deardorff, J. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J. geophys. Res*, 83(4):1889–1903.
- Dias, N. L., Kan, A., Grodzki, L., Sanchez, S. D., e Vissotto, D. (2002). O método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA) para medição dos fluxos de calor sensível e latente: aplicação ao lago de Itaipu e seu redor. *Revista Brasileira de Recursos hídricos*, 7(1):143–160.
- Dickinson, R. E. (1984). Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. *Climate processes and climate sensitivity*, páginas 58–72.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. J., e Wilson, M. F. (1986). Biosphere/atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model. *Technical report*.
- Dougherty, R. L., Bradford, J. A., Coyne, P. I., e Sims, P. L. (1994). Applying an empirical model of stomatal conductance to three C-4 grasses. *Agricultural and forest meteorology*, 67(3):269–290.
- Farquhar, G., von Caemmerer, S. v., e Berry, J. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149(1):78–90.
- Farquhar, G. D. e Sharkey, T. D. (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual review of plant physiology*, 33(1):317–345.
- Foley, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S., e Haxeltine, A. (1996). An Integrated Biosphere Model of Land Surface Proces-

- ses, Terrestrial Carbon Balance and Vegetation Dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 10:603–628.
- Gallegos, H. G., Righini, R., e Dursi, O. (2004). PRIMERAS MEDICIONES DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN SAN MIGUEL, PROVINCIA DE BUENOS AIRES. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8(2):11.13–11.17.
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L., e Los, S. O. (2006). Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 111(D18).
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., e Viovy, N. (2008). Modelling energy and CO2 fluxes with an interactive vegetation land surface model-Evaluation at high and middle latitudes. *agricultural and forest meteorology*, 148(10):1611–1628.
- GOMES, E., ESCOBEDO, J., FRISINA, V., e ANGELA, R. (2000). Modelo da radiação direta fotossintética horária. Em *CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, volume 11, páginas 152–8.
- Goudriaan, J., Van Laar, H., Van Keulen, H., e Louwse, W. (1985). Photosynthesis, CO2 and plant production. Em *Wheat growth and modelling*, páginas 107–122. Springer.
- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J. P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottl, C., e Vidal-Madjar, D. (1999a). The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I: Model and database. *J of Hydrology*, 217:75–96.
- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J. P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottl, C., e Vidal-Madjar, D. (1999b). The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part II: Simulation of streamflows and annual water budget. *J of Hydrology*, 217:97–118.

- Habets, F. e Saulnier, G. M. (2001). Subgrid Runoff Parameterization. *Physics and Chemistry on Earth (B)*, 26(5-6):455–459.
- Henderson, S., Hattersley, S., von Caemmerer, S., e Osmond, C. (1994). *Ecophysiology of Photosynthesis*, capítulo Are C_4 pathway plants threatened by global climatic change?, páginas 529–549. Springer-Verlag.
- Jacobs, C. (1994). *Direct impact of atmospheric CO₂ enrichment on regional transpiration*. Tese de Doutorado, Department of Meteorology, Wageningen Agricultural University, TheNetherlands.
- Jacobs, C. M., van den Hurk, B. J., e de Bruin, H. A. (1996). Stomatal Behaviour and Photosynthetic Rate of Unstressed Grapevines in Semi-arid Conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 80:111–134.
- Jarvis, P. G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductances found in canopies in the field. *Phil. Trans. Roy Soc, London, Ser. B*, 273:593–610.
- Jarvis, P. G. e McNaughton, K. (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in ecological research*, 15(1):49.
- Keulen, H. v., Wolf, J., et al. (1986). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Pudoc.
- Kim, J. e Verma, S. B. (1991). Modeling canopy photosynthesis: scaling up from a leaf to canopy in a temperate grassland ecosystem. *Agricultural and forest meteorology*, 57(1):187–208.
- Knapp, A. (1993). Gas exchange dynamics in C_3 and C_4 grasses: Consequences of difference in stomatal conductance. *Ecology*, (74):113–123.
- Louis, J. F. (1979). A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 17:187–202.
- Lynn, B. H. e Carlson, T. N. (1990). A stomatal resistance model illustrating plant vs. external control of transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52(1):5–43.

- Mahfouf, J. F. e Noilhan, J. (1996). Inclusion of gravitational drainage in a land surface scheme based on the restore method. *J. Appl. Meteorol.*, 35:987–992.
- Makela, A., Berninger, F., e Hari, P. (1996). Optimal control of gas exchange during drought: theoretical analysis. *Annals of Botany*, 77(5):461–468.
- Manzi, A. O. e Planton, S. (1994). Implementation of the isba parameterization scheme for land surface process in a GMC - an annual cycle experiment. *J of Hydrology*, 155:353–387.
- Mascart, P., Noilhan, J., e Giordani, H. (1995). A modified parameterization of flux-profile relationships in the surface layer using different roughness length values for heat and momentum. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 72:331–344.
- McCree, K. J. (1972). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9:191–216.
- Meek, D., Hatfield, J., Howell, T., Idso, S., e Reginato, R. (1984). A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. *Agronomy journal*, 76(6):939–945.
- Meyers, T. P. e U Paw, K. (1987). Modelling the plant canopy micrometeorology with higher-order closure principles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 41(1):143–163.
- Monteith, J. (1995a). Accommodation between transpiring vegetation and the convective boundary layer. *Journal of Hydrology*, 166(3):251–263.
- Monteith, J. (1995b). A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell & Environment*, 18(4):357–364.
- Monteith, J. e Unsworth, M. (2013). *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*. Academic Press, quarta edição.
- Moon, P. (1940). Proposed standard solar-radiation curves for engineering use. *Journal of the Franklin Institute*, 230(5):583–617.

- Morison, J. I. e Gifford, R. M. (1983). Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity a comparison of two C3 and two C4 grass species. *Plant physiology*, 71(4):789–796.
- Mott, K. A. (1988). Do stomata respond to CO₂ concentrations other than inter-cellular? *Plant Physiology*, 86(1):200–203.
- Niyogi, D. S. e Raman, S. (1997). Comparison of four different stomatal resistance schemes using FIFE observations. *Journal of Applied Meteorology*, 36(7):903–917.
- Noilhan, J. e Mahfouf, J.-F. (1996). The Isba Land Surface Parameterisation Scheme. *Global and Planetary Change*, 13:145–159.
- Noilhan, J. e Planton, S. (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117:536–549.
- Papaioannou, G., Nikolidakis, G., Asimakopoulos, D., e Retalis, D. (1996). Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81(3):287–298.
- Pereira, A. B., Vrisman, A. L., e Galvani, E. (2002). Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. *Scientia Agricola*, 59(2):211–216.
- Pereira, A. R., Machado, E. C., e de Camargo, M. B. P. (1982). Solar radiation regime in three cassava (*Manihot esculenta* Crantz) canopies. *Agricultural Meteorology*, 26(1):1–10.
- Pleim, J. E. e Xiu, A. (1995). Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models. *Journal of Applied Meteorology*, 34(1):16–32.
- Posse, G., Richter, K., Corin, J. M., Lewczuk, N. A., Achkar, A., e Rebella, C. (2010). Carbon dioxide fluxes on a soybean field in Argentina: influence of crop growth stages. *Open Agriculture Journal*, 4:58–63.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., e Flannery, B. P. (1993). *Numerical Recipes in FORTRAN; The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2nd edição.

- Prevedello, C. L. (1996). *Física dos Solos com problemas resolvidos*. SAEAFS - Salesward-Discovery.
- Prevedello, C. L. (2002). Adequação Paramétrica dos Modelos de Transferência de Noilhan & Planton em Ambientes Tropicais.
- Prevedello, C. L. (2003). Experimentos de solo para Santa Terezinha do Itaipu e calibração dos tdr's.
- Raschke, K. (1979). Movements of stomata. *Encyclopedia of plant physiology*, 7:383–441.
- Raupach, M. (1991). Vegetation-atmosphere interaction in homogeneous and heterogeneous terrain: some implications of mixed-layer dynamics. *Vegetatio*, 91(1-2):105–120.
- Ryan, M. G., Linder, S., Vose, J. M., e Hubbard, R. M. (1994). Dark respiration of pines. *Ecological Bulletins*, páginas 50–63.
- Sellers, P., Mintz, Y., Sud, Y. e. a., e Dalcher, A. (1986). A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43(6):505–531.
- Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, C. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., e Collelo, G. D. (1996). A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs, Part I: Model Formulation. *Journal of Climate*, 9:676–705.
- Silveira, G. e Rosa, F. (2013). Especial Aprosoja-Soja na Argentina-Conjuntura de incerteza. *AgroANALYSIS*, 33(04):27–29.
- Smaha, N. (2003). Estudos e implementação de um esquema de interações superfície-atmosfera e seus impactos em um modelo de mesoescala. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.
- Stitt, M. (1991). Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. *Plant, Cell & Environment*, 14(8):741–762.

- Szeicz, G. (1974). Solar radiation for plant growth. *Journal of Applied Ecology*, páginas 617–636.
- Thompson, N., Ayles, M., e Barrie, I. (1981). *The Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS*. Met O 8 (Hydrometeorological Services).
- Thornley, J. H. et al. (1976). *Mathematical models in plant physiology*. Academic Press (Inc.) London, Ltd.
- Ting, K. e Giacomelli, G. A. (1987). Solar photosynthetically active radiation transmission through greenhouse glazings. *Energy in agriculture*, 6(2):121–132.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society Americanjournal*, páginas 892–898.
- Van Wijk, M., Dekker, S., Bouten, W., Bosveld, F., Kohsiek, W., Kramer, K., e Mohren, G. (2000). Modeling daily gas exchange of a Douglas-fir forest: comparison of three stomatal conductance models with and without a soil water stress function. *Tree Physiology*, 20(2):115–122.
- van't Hoff, J. H. (1898). Über die zunehmende Bedeutung der anorganischen Chemie. Vortrag, gehalten auf der 70. Versammlung der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte zu Dusseldorf. *Zeitschrift für anorganische Chemie*, 18(1):1–13.
- Vissotto, D. (2003). Modelagem numérica para interações superfície-atmosfera no estado do Paraná. Tese de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- Viterbo, P. e Beljaars, A. C. (1995). An improved land surface parameterization scheme in the ECMWF model and its validation. *Journal of Climate*, 8(11):2716–2748.
- Wang, S., Grant, R., Verseghy, D., e Black, T. (2001). Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS - the Canadian Land Surface Scheme. *Ecological Modelling*, 142(1):135–154.

- Wetzel, P. J. e Chang, J.-T. (1988). Evapotranspiration from nonuniform surfaces: A first approach for short-term numerical weather prediction. *Monthly Weather Review*, 116(3):600–621.
- Wong, S., Cowan, I., e Farquhar, G. (1979). Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity.
- Wood, E., Lettenmaier, D., e Zartarianm, V. (1992). A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for General Circulation Models. *J of Geophysics Res*, 97:2717–2728.