



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15202-TDI/1302

**CALIBRAÇÃO DO “SIMPLIFIED SIMPLE BIOSPHERE MODEL
– SSiB” PARA O BIOMA CAATINGA DO NORDESTE
BRASILEIRO**

Ana Paula Martins do Amaral Cunha

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela
Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 30 de novembro de 2007.

INPE
São José dos Campos
2008

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15202-TDI/1302

**CALIBRAÇÃO DO “SIMPLIFIED SIMPLE BIOSPHERE MODEL
– SSiB” PARA O BIOMA CAATINGA DO NORDESTE
BRASILEIRO**

Ana Paula Martins do Amaral Cunha

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pela
Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 30 de novembro de 2007.

INPE
São José dos Campos
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C914c Cunha, Ana Paula Martins do Amaral
Calibração do "Simplified Simple Biosphere Model – SSiB" para o
Bioma Caatinga do Nordeste Brasileiro / Ana Paula Martins do Amaral
Cunha. – São José dos Campos: INPE, 2007.
130p. ; (INPE-15202-TDI/1302)

1.SSiB. 2.Parâmetros de superfície. 3.Calibração.
4.Estudo de sensibilidade. 5.Caatinga. I.Título.

CDU 551.5

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia

Dra. Chou Sin Chan



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá



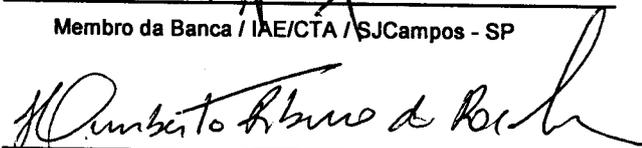
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Gilberto Fernando Fisch



Membro da Banca / IAE/CTA / SJCampos - SP

Dr. Humberto Ribeiro da Rocha



Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Aluno (a): Ana Paula Martins do Amaral Cunha

São José dos Campos, 30 de Novembro de 2007

FOLHA DE APROVAÇÃO

CONFECCIONADA PELO SPG E INCLUÍDA PELO SID.

*“A sabedoria é suprema; portanto, adquira a sabedoria. Sim, com tudo o que possui
adquire o entendimento.”*

PROVÉRBIOS 4:7

Dedico este trabalho ao meu marido, Vinícius, por todo amor, dedicação e compreensão, em todos os momentos desta e de outras etapas importantes em minha vida. Ofereço, também, a uma pequena pessoa muito especial que surgiu durante esta caminhada, ao meu filho Marcos Vinícius. E, finalmente à minha orientadora, Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá, pelo constante incentivo e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem Ele, nada seria possível.

A minha orientadora, Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá, pelas contribuições imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho, pelas palavras de incentivo e de apoio.

Aos membros da Banca Examinadora, pelas valiosas contribuições para o aprimoramento deste trabalho e pela atenção dispensada ao lerem a minha Dissertação e ao me avaliarem.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo no período de março de 2005 a março de 2007;

Ao Dr. Francis Wagner Silva Correia, pela colaboração e sugestões dadas durante a elaboração deste trabalho.

Ao amigo Paulo Yoshio Kubota, pela disposição e boa vontade em me ajudar com a programação.

À Maria Betânia Leal de Oliveira, pela disponibilização dos dados necessários para a execução deste trabalho.

À minha amiga Luciana Rossato, pelo companheirismo e amizade, nunca me deixando desanimar, mesmo nas horas mais difíceis.

À Lílian Escobar Resende, pelo competente apoio durante todos os anos de mestrado.

Ao INPE, pelas facilidades oferecidas através da organização do curso de Pós-Graduação e do suporte e autonomia dados à Biblioteca, no sentido de sempre priorizar o conhecimento e evolução intelectual e profissional de seu corpo discente.

A todo o Corpo Docente e amigos que se fizeram presentes e que de alguma forma tornaram possível esta grande conquista.

RESUMO

O esquema de superfície Simplified Simple Biosphere Model (SSiB) calcula as trocas turbulentas de energia e umidade entre a superfície vegetada e a atmosfera. Considerando que o modelo SSiB necessita de muitos parâmetros de entrada e que a prescrição incorreta ou insuficiente na representação desses parâmetros pode conduzir a uma deficiência no diagnóstico dos fluxos turbulentos à superfície, propôs-se neste trabalho realizar a calibração mensal dos parâmetros do modelo SSiB para área de caatinga do Nordeste brasileiro. Para isto foram utilizadas medidas micrometeorológicas e hidrológicas obtidas para o período de julho de 2004 a junho de 2005 no Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA). Antes de iniciar o processo de calibração efetuou-se um estudo de sensibilidade do esquema SSiB, a fim de determinar o conjunto de parâmetros que apresenta maior sensibilidade em relação aos processos de troca entre a superfície e a atmosfera. Desse estudo, verificou-se que o parâmetro que relaciona a umidade volumétrica do solo e o potencial de umidade no solo (parâmetro B), o potencial de água no solo à saturação (ψ_s), a condutividade hidráulica à saturação (K_s) e a porosidade do solo (θ_s), quando modificados, foram os que conduziram às maiores variações nos fluxos turbulentos. Com os parâmetros iniciais, o modelo SSiB simulou bem o saldo de radiação. O fluxo de calor latente foi superestimado e o fluxo de calor sensível subestimado para todo o período de simulação, o que deve estar relacionado aos parâmetros utilizados nos cálculos dessas variáveis. Com os parâmetros ajustados, melhores estimativas dos fluxos de calor latente e de calor sensível foram geradas. Após a calibração foi realizada a validação dos fluxos de superfície. Para isso foram utilizadas medidas micrometeorológicas, hidrológicas e de fluxos turbulentos obtidas no período de julho de 2005 a setembro de 2005. O modelo apresentou a mesma melhoria na estimativa dos fluxos de calor latente e de calor sensível, com valores mais altos dos coeficientes de correlação e diminuições nos erros médios e nos desvios médios quadráticos calculados. Com a melhoria na estimativa dos fluxos turbulentos, conseqüentemente, representou-se melhor a partição de energia na caatinga e, portanto, a representação dos processos de superfície. Portanto, espera-se que com o modelo SSiB calibrado com os dados da caatinga brasileira, acoplado aos modelos meteorológicos, obtenha-se previsões de tempo e clima mais realistas para a região do Nordeste do Brasil.

CALIBRATION OF THE SIMPLIFIED SIMPLE BIOSPHERE MODEL (SSiB) FOR THE BRAZILIAN NORTHEAST CAATINGA

ABSTRACT

The Simplified Simple Biosphere Model (SSiB) calculates the energy and moisture turbulent changes between vegetated surface and atmosphere. Considering that the SSiB model needs several parameters, an incorrect or insufficient representation of these parameters may cause a wrong partition of the turbulent fluxes at the surface. Thus, the objective of this work is performing a monthly calibration of the parameters of SSiB model for the Brazilian Northeast Caatinga. Micrometeorological and hydrological data collected during the period from July 2004 to June 2005, obtained in the Agricultural Research Center of the Semi-Arid Tropic (CPATSA), were used. Previously from the calibration process, a sensibility study of SSiB was performed in order to find the parameters that are sensible to the exchanges processes between the surface and atmosphere. The results showed that the B parameter, soil moisture potential at saturation (ψ_s), hydraulic conductivity of saturated soil (k_s) and the volumetric moisture at saturation (θ_s) allow high variations on turbulent flux. With the initial parameters, the SSiB model showed better results for net radiation. The latent heat (sensible heat) flux was super-estimated (under-estimated) for all period of simulation, what should be related to the parameters used in the calculations of these variables. Considering the calibrated parameters, better values of latent flux and sensible flux have been obtained. The calibrated parameters were also used for a validation of the surface fluxes considering data from July 2005 to September 2005. The results showed the model generated better estimations of latent heat and sensible heat fluxes; with high values for correlation coefficients and low error BIAS and root mean squared error. With the better estimations of the turbulent fluxes, it was possible to obtain more representative energy partitioning in *caatinga*. Therefore, it is expected that from this calibrated SSiB model, coupled to the meteorological models, it will be possible to obtain more realistic climate and weather forecasts for the Brazilian northeast region.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivos	27
2 ELEMENTOS TEÓRICOS	29
2.1 Desenvolvimento dos modelos de superfície continental	29
2.2 Principais estudos com esquemas de superfície	32
2.3 Os processos de superfície.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 O bioma Caatinga	39
3.2 Sítio experimental e dados	41
3.3 O esquema de superfície – SSiB.....	46
3.4 Testes de sensibilidade no esquema SSiB	56
3.5 Processo de calibração do esquema SSiB	56
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
4.1 Balanço de energia observado	61
4.2 Avaliação do Modelo SSiB	65
4.3 Estudo de sensibilidade dos parâmetros do esquema de superfície SSiB	74
4.4 Calibração dos parâmetros	88
4.5 Validação dos fluxos de superfície	102
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES	109
5.1 Conclusões.....	109
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE A	123

LISTA DE FIGURAS

3.1 – Localização geográfica da torre micrometeorológica instalada na Embrapa Semi-Árido em Petrolina, PE.....	41
3.2 – Foto ilustrativa das condições de pista a leste da torre micrometeorológica instalada na Embrapa Semi-Árido em Petrolina, PE.	42
3.3 – Precipitação pluviométrica média mensal (mm) da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina-PE 09°09' S 40°22' W). Período 1975-2004.	42
Fonte: Oliveira et al. (2006).	42
3.4 – Torre micrometeorológica instalada na área da Embrapa Semi-Árido em Petrolina, PE.	43
3.5 - Diagrama esquemático do modelo SSiB. Tr é a temperatura do ar na altura de referência, Tc a temperatura do dossel, Ta a temperatura do ar dentro do dossel, Tg a temperatura do solo, ra a resistência aerodinâmica entre o ar do dossel e a altura de referência, rb a resistência totalizadora da camada limite, rc a resistência estomática, e rd aerodinâmica entre o ar do dossel e o solo.	50
Fonte: Xue et al. (2001).	50
4.1 – (a) Médias diárias das temperaturas média, máxima e mínima do ar; (b) radiação solar incidente média diária ($W m^{-2}$); (c) máximas diárias da umidade do solo, em campo experimental na Caatinga, Embrapa Semi-Árido/Petrolina, PE, no período de 01 de julho de 2004 a 30 de julho de 2005.	62
Fonte: Adaptada de Oliveira et al. (2006).	62
4.2 – Ciclos diários dos componentes do balanço de energia para os meses: (a) julho de 2004 e (b) março de 2005.	65
4.3 – Fluxos calculados de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE) e de calor sensível (H) versus os observados (julho a setembro de 2004).	66
4.4 – Evolução temporal dos fluxos de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE) e de calor sensível (H) calculados pelo SSiB (linha sólida) e observados (pontilhados) para o mês de julho de 2004.	69
4.5 – Fluxos calculados de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE), de calor sensível (H) e calor no solo (G) versus os observados (janeiro a março de 2005).	70
4.6 – Evolução temporal dos fluxos de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE) e de calor sensível (H) calculados pelo SSiB (linha sólida) e observados (pontilhados) para o mês de março de 2005.	73
4.7 – Média diária (a) do fluxo de calor latente (LE) e (b) do fluxo de calor sensível (H) para dias secos (6 e 7 de julho de 2004) e dias úmidos (12 e 13 de março de 2005) variando-se o índice de área foliar (LAI).	83
4.8 – Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Julho de 2004).	93
4.9 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Agosto de 2004).	93
4.10 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Setembro de 2004).	93

4.11 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Outubro de 2004).	94
4.12 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Novembro de 2004).	94
4.13 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Dezembro de 2004).	94
4.14 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Janeiro de 2005).	96
4.15 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Fevereiro de 2005).	96
4.16 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Março de 2005).	96
4.17 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Abril de 2005).	97
4.18 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Maio de 2005).	97
4.19 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Junho de 2005).	97
4.20 – Fluxos calculados de saldo de radiação, de calor latente, de calor sensível e calor no solo versus os observados – antes da calibração (julho a setembro de 2005).	104
4.21 - Fluxos calculados de saldo de radiação, de calor latente, de calor sensível e calor no solo versus os observados – após a calibração (julho a setembro de 2005).	105
4.22 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (julho de 2005).	106
4.23 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (agosto de 2005).	106
4.24 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (setembro de 2005).	106

LISTA DE TABELAS

3.1 – Grandezas medidas no experimento e os respectivos instrumentos	45
3.2 – Parâmetros morfológicos, fisiológicos e físicos do modelo SSiB	48
3.3 – Classificação dos Biomas Segundo Dorman e Sellers (1989).....	49
4.1 – Balanço de energia dos dados observados.....	64
4.2 – Resultados estatísticos da simulação para caatinga – parâmetros não calibrados (meses secos) ($W m^{-2}$)	68
4.3 – Parâmetros fixos e sazonais do modelo SSiB para o bioma caatinga (tipo 8) (Dorman e Sellers, 1989).....	71
4.4 – Resultados estatísticos da simulação para caatinga – parâmetros não calibrados (meses úmidos) (Wm^{-2})	72
4.5 – Total mensal da precipitação pluviométrica no campo experimental de caatinga, Embrapa Semi-Árido/Petrolina, no período de julho de 2004 a junho de 2005.....	75
4.7 – Testes de sensibilidade para o mês de agosto de 2004.....	77
4.8 – Testes de sensibilidade para o mês de setembro de 2004.....	78
4.9 – Testes de sensibilidade para o mês de janeiro de 2005	79
4.10 – Testes de sensibilidade para o mês de fevereiro de 2005	80
4.11 – Testes de sensibilidade para o mês de março de 2005	81
4.12 – Resultados do processo de otimização dos parâmetros fixos	89
4.13 – Resultados do processo de otimização dos parâmetros sazonais (Ano 2004)	90
4.14 – Resultados do processo de otimização dos parâmetros fixos (Ano 2005)	91
4.15 – Resultados estatísticos do processo de calibração (Ano 2004).....	99
4.16 – Resultados estatísticos do processo de calibração (Ano 2005).....	101
4.17 – Comparação dos parâmetros da vegetação e do solo	102
4.18 – Resultados estatísticos do processo de validação (Ano 2005).....	107
A.1 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de outubro de 2004	124
A.2 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de novembro de 2004.....	125
A.3 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de dezembro de 2004	126
A.4 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de abril de 2005	127
A.5 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de maio de 2005.....	128
A.6 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de junho de 2005.....	129

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRACOS	Anglo Brazilian Amazonian Climate Observation Study
APNE	Associação Plantas do Nordeste
BATS	Biosphere Atmosphere Transfer Scheme
CHeRES	China Heavy Rainfall Experiment and Study
CLM	Common Land Model
COLA	Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
CPATSA	Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DMQ	Desvio Médio Quadrático
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
HAPEX	Hydrological Atmospheric Pilot Experiment
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBIS	Integrated Biosphere Simulator Model
LAI	Leaf Area Index
LAPS	Land Air Parameterization Scheme
LBA	Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia
LSPs	Land Surface Parameterizations
MCGA	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MR	Modelos Regionais
NCAR	National Center for Atmospheric Research
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
RMSE	Raiz do erro quadrado médio
SEBEX	Sahelian Energy Balance Experiment
SiB	Simple Biosphere
SSiB	Simplified Simple Biosphere
SVAT	Soil Vegetation Atmosphere Transfer
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

a	coeficiente de resistência estomática à radiação PAR
b	coeficiente de resistência estomática à radiação PAR
B	parâmetro que relaciona a umidade volumétrica do solo e o potencial de umidade no solo
c	coeficiente de resistência estomática à radiação PAR
C_c	capacidade calorífica da vegetação
C_d	coeficiente de arrasto aerodinâmico
C_b	coeficiente de arrasto aerodinâmico
C_{gs}	capacidade calorífica do solo
c_p	calor específico do ar
C_1	parâmetro governante da resposta estomática ao potencial de água na folha
C_2	parâmetro governante da resposta estomática ao potencial de água na folha
d	deslocamento do palmo zero
D_c	taxa de drenagem no dossel
D_i	espessura da i -ésima camada do solo
e_a	pressão de vapor no dossel
E_{wc}	taxa de evaporação da porção úmida da vegetação
f_h	umidade relativa do ar na superfície
F_c	soma das radiações de ondas curtas e longas absorvidas pelo dossel
F_{gs}	soma das radiações de ondas curtas e longas absorvidas pela superfície
F_i	desvio do erro calculado a cada passo de tempo
G_{gs}	fluxo de calor no solo
H	fluxo de calor sensível
H_c	fluxo de calor sensível associado à fração de área vegetada
H_{gs}	fluxo de calor sensível associado à fração de solo
H_s	fator de ajuste que é função do conteúdo de água na camada
h_s	parâmetro do déficit de pressão de vapor d'água
K_s	condutividade hidráulica do solo à saturação
$K \downarrow$	radiação solar incidente
$K \uparrow$	radiação solar global refletida pela superfície
$L \downarrow$	radiação de onda longa proveniente da atmosfera
$L \uparrow$	radiação de onda longa emitida pela superfície
LE	fluxo de calor latente
L_c	Índice de área foliar
M_c	armazenamento de água por interceptação do dossel
N_c	fração de folha verde
P_c	taxa de interceptação de precipitação no dossel
Q_{ij}	transferência de água entre as i -ésima e j -ésimas camadas do solo
r_a	resistência Aerodinâmica à transferência turbulenta de umidade e calor
r_b	resistência Aerodinâmica à transferência turbulenta de umidade e calor
r_c	resistência estomática do dossel
r_d	resistência Aerodinâmica à transferência turbulenta de umidade e calor

R_n	saldo de radiação à superfície
R_{nc}	saldo de radiação no dossel
R_{ngs}	saldo de radiação no solo
R_{surf}	resistência do solo nu
T_L	temperatura mínima para o funcionamento estomatal
T_h	temperatura máxima para o funcionamento estomatal
T_o	temperatura ótima para o funcionamento estomatal
T_a	temperatura do ar dentro do dossel
T_c	temperatura do dossel
T_d	temperatura solo profundo
T_{gs}	temperatura do solo
T_r	temperatura de referência
V_c	fração de cobertura vegetal
W_1	umidade na primeira camada do solo
W_2	umidade na segunda camada do solo
W_3	umidade na terceira camada do solo
W_c	fração da caixa de grade coberta por vegetação
Z_0	comprimento de rugosidade
Z_2	altura do topo do dossel
Z_d	profundidade das raízes
α	inclinação
λE_c	fluxo de calor latente associado à fração de área vegetada
λE_{gs}	fluxo de calor latente associado à fração de solo
λ	calor latente de vaporização
ρ	massa específica do ar
ρ_w	massa específica da água
γ	constante psicrométrica
π	número pi
χ_L	distribuição do ângulo da folha
ψ	potencial de água no solo
ψ_s	potencial de água no solo a saturação
σ_s	constante de Stefan-Boltzmann
δ_t	transmitância da radiação infravermelha termal para o dossel
τ	duração do dia em segundos
θ_s	porosidade do solo
μ	albedo da superfície
ξ	ângulo zenital
δ	fração de cobertura de neve

1 INTRODUÇÃO

A atmosfera é sensível às características da superfície continental, tais como o albedo, a rugosidade e a umidade do solo, em diferentes escalas de tempo. Dessa forma, variações nas características da vegetação e do solo implicam em impactos significativos no clima. Com isso, a melhor representação dos processos de superfície nos modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA) e nos modelos regionais (MR) tornou-se fundamental, estimulando ao desenvolvimento de sofisticadas parametrizações da superfície, que melhor representem os processos de trocas entre a superfície e a atmosfera.

Os processos de superfície continentais caracterizam-se por apresentar efeitos substanciais sobre as previsões de tempo e clima o que está associado a um crescente esforço em se melhorar o conhecimento das complexas interações que ocorrem na camada superficial. Para investigar esta questão, diversos MCGAs e MRs, acoplados a esquemas de superfície, vêm sendo utilizados. A representação inadequada ou insuficiente das condições e dos processos da superfície continental pode provocar um impacto negativo sobre as previsões de tempo e de clima, afetando suas confiabilidades. Previsões climáticas confiáveis são de fundamental importância para a sociedade e tomadores de decisão, uma vez que são essenciais para o gerenciamento de atividades do setor agrícola, de recursos hídricos e energéticos, entre outras atividades econômicas do país.

Diversos estudos têm sido realizados para se identificar a influência dos processos de superfície no comportamento da atmosfera associados ao aprimoramento da representação das condições da superfície (representação correta dos diferentes biomas) em modelos numéricos. Fennessy e Xue (1997) mostraram, através de um MCGA, que erros sistemáticos na previsão sazonal nos campos de temperatura (4 K maior que o observado) e de precipitação (0,5 a 1,0 mm dia⁻¹ menor que o observado) na região central dos Estados Unidos estavam relacionados ao tipo de vegetação representado no

esquema de superfície. Isto confirma a idéia de que a vegetação da superfície é um importante fator que influencia o clima.

Nas últimas décadas, considerável progresso no entendimento dos processos micrometeorológicos tem sido alcançado através de trabalhos teóricos e observações de experimentos de campo (Dolman et al. 1991). Os resultados desses estudos foram incorporados em esquemas de transferência solo-planta-atmosfera (SVATS), os quais podem ser acoplados a MCGAs ou MRs (Dickinson et al. 1986; Sellers et al. 1986; Xue et al. 1991, entre outros). Atualmente, existe uma diversidade de SVATS revelando um substancial progresso científico no que concerne à incorporação dos mecanismos biofísicos mais realistas nos modelos meteorológicos. Os esquemas de superfície vão desde aqueles que simulam apenas as trocas de momentum, de energia e de vapor d'água entre a superfície e a vegetação (BATS - Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (Dickinson et al., 1986), SSiB - Simplified Simple Biosphere Model (Xue et al, 1991), LAPS - Land Air Parameterization Scheme (Mihailovic 1996), CLM – Common Land Model (Dai et al., 2001)) até versões mais sofisticadas, como é o caso do “Integrated Biosphere Simulator Model” - IBIS (Delire et al. 1999), que inclui, além das trocas já citadas, o ciclo de carbono, nutrientes e a dinâmica da vegetação.

O MCGA do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) inclui, como esquema de biosfera, a versão simplificada (denominada SSiB, Xue et al., 1991) do Simple Biosphere Model – SiB (Sellers et al. 1986). O modelo SiB representou, quando de sua concepção, um grande avanço na modelagem da superfície continental. Ele é considerado, do ponto de vista biofísico, um modelo realista por basear-se nos processos físicos de interação continente-atmosfera. O modelo SSiB foi concebido para simular a interação entre a superfície e a atmosfera, descrevendo os processos de transferência radiativa, turbulenta e controle biofísico da evapotranspiração. Em comparação com outros esquemas de superfície, o modelo SSiB é mais complexo no tratamento do albedo, da energia da superfície e da umidade do solo, necessitando de um conjunto de parâmetros morfológicos (tipos de árvores, tipos de solos, profundidade de raízes, etc.), fisiológicos (fração de folhas verdes, controle de temperatura para funcionamento dos

estômatos, etc.) e físicos (comprimento de rugosidade, altura de deslocamento, inclinação, etc.) para o cálculo das trocas entre a superfície e a atmosfera.

Muitos desses parâmetros podem apresentar incertezas quanto às suas especificações ou não ter nenhuma medida de campo associada aos mesmos. Neste caso, faz-se necessário que os tais parâmetros sejam ajustados ou calibrados, a fim de melhor representar as características físicas e fisiológicas da superfície continental. No que concerne aos biomas floresta e pastagem da região da Amazônia Brasileira, diferentes esquemas de superfície têm sido calibrados considerando dados obtidos em experimentos de campo (Rocha et al. 1996; Delire e Foley 1999; Correia et al. 2005; Imbuzeiro 2005;). O conjunto de parâmetros gerado nesses estudos conduziu a um melhor ajuste entre os fluxos turbulentos de calor latente e calor sensível calculados e os observados.

No entanto, outros biomas descritos pelo modelo SSiB para o território brasileiro, tais como a caatinga, o cerrado, o pantanal, necessitam de ajustes em seus parâmetros de superfície para obter melhorias nas representações dos processos de superfícies nos modelos atmosféricos. Dentre esses biomas destaca-se a caatinga, a qual cobre, segundo Velloso et al. (2002) a maior parte da região Nordeste do Brasil, distribuída numa área de aproximadamente 800.000 km² e caracterizada por apresentar uma grande biodiversidade.

Outrossim, o papel da caatinga brasileira na interação solo-vegetação-atmosfera é ainda pouco conhecido; portanto, faz-se necessário considerar medidas micrometeorológicas representativas deste bioma para avaliação dos modelos de superfície e para verificação posterior do impacto da melhoria da sua representação nos modelos de previsão de tempo, de clima e de água no solo de uma importante região do país.

1.1 Objetivos

Considerando que a prescrição incorreta ou insuficiente na representação dos parâmetros morfológicos, físicos e fisiológicos da superfície pode conduzir a uma deficiência na representação dos processos de transferência turbulenta entre a superfície

e a atmosfera, o que afetaria as previsões de tempo e climática, propôs-se, neste trabalho, realizar a calibração dos parâmetros do modelo SSiB para área de caatinga do Nordeste brasileiro. Para essa finalidade foram utilizadas medidas micrometeorológicas e hidrológicas obtidas no período de julho de 2004 a setembro de 2005 na área experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA). Para atingir o objetivo proposto foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Estudo de sensibilidade dos parâmetros morfológicos, fisiológicos e físicos do esquema SSiB a fim de determinar o conjunto de parâmetros mais sensível em relação aos processos de troca entre a superfície e a atmosfera;
- b) Validação do esquema de superfície SSiB;
- c) Calibração dos parâmetros do modelo SSiB;
- d) Validação do saldo de radiação (R_n), dos fluxos de calor sensível (H), de calor latente (LE) e de calor no solo (G), calculados utilizando os novos parâmetros ajustados, a fim de se verificar a acurácia das informações obtidas pelo processo de calibração.

2 ELEMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo apresenta-se uma revisão histórica da evolução das parametrizações da superfície continental, destacando as principais mudanças que os modelos de superfície têm apresentado nas últimas décadas. Além disso, é apresentada-se uma descrição dos processos de superfície.

2.1 Desenvolvimento dos modelos de superfície continental

Nos primeiros Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA), a superfície continental era considerada simplesmente um refletor de radiação solar e um emissor de radiação infravermelha (Dickinson e Henderson-Sellers, 1988). Até o início dos anos 80 os MCGAs incorporavam parametrizações simples para a representação da superfície continental e para estimativa da transferência de calor, de umidade e de momentum entre a superfície continental e a atmosfera. Com o avanço do conhecimento nas áreas da biogeofísica e da micrometeorologia, estas parametrizações simples foram substituídas por esquemas que descrevem de forma mais realista as interações na biosfera. Estes modelos mais avançados têm sido utilizados no estudo da resposta da biosfera e do sistema climático aos cenários de mudanças climáticas globais.

Dentro do contexto de modelagem climática, a inclusão da representação dos processos de superfície continental em um MCGA foi iniciada no final da década de 60 por Manabe (1969), quando representou o balanço de água no solo utilizando uma parametrização simples. Este primeiro esquema de superfície foi denominado modelo "bucket" ou modelo de "balde". A denominação desse modelo se deve à analogia feita a um balde (representando o solo) que depois de cheio (ou seja, com precipitação excedendo evaporação) extravasa a água e esta é escoada (runoff).

Dickinson (1984), baseando-se no modelo de Deardoff (1978), propôs a incorporação de uma descrição mais acurada dos processos de interação biosfera-atmosfera, para aplicação em estudos com MCGA, considerando explicitamente o controle fisiológico da vegetação no cálculo da evapotranspiração. Mais tarde, em 1986, este modelo de

superfície, denominado “Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme” (BATS) (Dickinson et al., 1986) é implementado no modelo atmosférico do "National Center for Atmospheric Research" (NCAR). No mesmo ano, Sellers et al. (1986) desenvolveram o modelo "Simple Biosphere" (SiB), o qual pode ser acoplado a MCGAs ou a modelos regionais.

Os esquemas de transferência solo-vegetação-atmosfera (SVAT) introduzidos em meados dos anos 80 por Dickinson et al. (1986) e Sellers et al. (1986) são bem fundamentados fisicamente. A vegetação é explicitamente representada e influencia diretamente a determinação dos balanços de energia e de água na superfície, admitindo o controle estomático em resposta ao estresse hídrico do ambiente. Três gerações de modelos podem ser consideradas na evolução das parametrizações que representam a superfície continental. A primeira, desenvolvida durante as décadas de 60 e 70, dava pouca importância à transferência de calor, de momentum, e de água na biosfera. Esta geração foi baseada em formulações simples de transferência aerodinâmica e, muitas vezes, utilizando valores prescritos e invariantes dos parâmetros que descrevem as características da superfície, tais como o albedo, a rugosidade e a umidade do solo.

No início dos anos 80, a substituição dos primeiros modelos por esquemas mais complexos deu início à segunda geração. A inclusão de uma representação mais elaborada dos processos físicos levou a significativas melhorias no desempenho dos modelos atmosféricos, tanto para as previsões de tempo quanto para as simulações climáticas. Ao mesmo tempo foi necessária a elaboração de um conjunto de parâmetros que descrevesse as variações espaciais das características da superfície, em escala global, para ser introduzidos nos modelos. Este conjunto de parâmetros foi organizado com base em estudos ecológicos e geográficos (Sellers et al., 1986). Todavia, esta segunda geração de modelos incorporava descrições empíricas do processo de transpiração, pelo qual a água é extraída do solo pelas raízes das plantas e é transferida para a atmosfera através dos estômatos das folhas.

No final dos anos 80, o interesse da comunidade científica no estudo do impacto climático associado ao aumento da concentração de CO₂ atmosférico gerou a necessidade de incluir nos MCGAs a troca de gases do efeito estufa entre os diferentes meios (oceano, continente e atmosfera). Apoiado nos avanços do conhecimento da fisiologia vegetal, alguns modelos biogeoquímicos foram desenvolvidos contemplando-se a descrição explícita da assimilação de CO₂ pelo sistema climático (Sellers et al., 1997), ampliando as fronteiras dos estudos de mudanças climáticas.

No início da década de 90, surgiu a terceira geração de modelos de biosfera, os quais consideram as teorias dos processos de fotossíntese e as relações água-planta para fornecer uma descrição mais consistente da transferência de calor, de umidade e de gás carbônico entre as plantas e o ar adjacente. Esta nova geração de modelos combinou a descrição do sistema físico climático com os processos biofísicos e biogeoquímicos. Outros modelos também incorporaram a dinâmica de nutrientes e de competição ecológica, através de fatores bio-geográficos. Neste caso, a vegetação sofre alterações em resposta à mudança no clima. Além disso, algumas características da superfície continental, antes prescritas, passaram a ser obtidas continuamente em escala global através de sensoriamento remoto. Segundo Sellers et al. (1997), a próxima geração de modelos atmosféricos deverá contemplar a transferência de calor, momentum, umidade e carbono entre o continente e a atmosfera de forma conjunta, além de incluir as características da superfície na escala de sub-grade. Adicionalmente, avanços na descrição da hidrologia e da cobertura vegetal fazem-se necessários (Cândido, 2002).

Os mais recentes SVATs (Henderson-Sellers et al., 2002) incluem representações do dossel da vegetação, bem como a sua função no controle da evapotranspiração e interceptação da precipitação. Além disso, a transferência de umidade e a energia no solo são modeladas considerando-se múltiplas camadas de solo.

2.2 Principais estudos com esquemas de superfície

Vários experimentos numéricos com diferentes esquemas de superfície, na versão “off-line” (desacoplada do modelo meteorológico), têm sido realizados com a finalidade de validação e estudos de sensibilidade (Sellers et al. 1989; Xue et al., 1996; Delire e Foley 1999; entre outros). Além disso, outros experimentos descrevem os resultados de estudos de calibração efetuados considerando-se diferentes modelos de biosfera (Sellers et al. 1989; Rocha et al. 1996; Correia et al. 2005; Imbuzeiro 2005; Kahan et al. 2006). A seguir, são descritos sucintamente alguns dos principais experimentos de estudo de calibração.

Sellers et al. (1989) utilizando medidas micrometeorológicas, incluindo fluxos turbulentos de calor coletados acima do dossel da floresta amazônica, validaram e calibraram os parâmetros do modelo SiB. Para isto, considerou-se um método iterativo de otimização para definir um novo conjunto de parâmetros físicos e fisiológicos da vegetação, que resultou num melhor ajuste entre os fluxos de calor latente e de calor sensível calculados e os observados. O conjunto de parâmetros otimizados gerou menores valores de condutância do dossel em relação àqueles descritos na literatura, bem como mostrou que a resposta estomática ao déficit de pressão de vapor d'água e ao potencial d'água na folha desempenha papel importante na determinação do curso diurno da transpiração da floresta tropical.

Rocha et al. (1996) utilizaram dados meteorológicos coletados em dois sítios de pastagem durante o projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study), com o propósito de calibrar os parâmetros do modelo SiB para esse bioma. Os resultados indicaram que o conjunto de parâmetros iniciais superestimava o fluxo de calor sensível e subestimava a evapotranspiração, enquanto que os parâmetros otimizados implicaram em melhoria considerável na estimativa e no ajuste em relação aos fluxos observados.

Outro estudo de calibração foi desenvolvido por Delire e Foley (1999), que efetuaram a calibração da versão 2.0 do IBIS (Integrated Biosphere Simulator Model), para cinco diferentes regiões do globo. O modelo IBIS considera diversos processos, incluindo as interações entre a superfície e a atmosfera, o ciclo de carbono e nutrientes, e a dinâmica da vegetação. Para tanto, usaram diversas medidas biofísicas, dentre as quais incluem-se as medições de fluxos obtidos no sítio da Reserva Biológica do Jarú, no escopo do projeto ABRACOS. Os resultados mostraram uma boa estimativa do saldo de radiação; entretanto, o fluxo de calor no solo foi superestimado, provavelmente pelo modelo não considerar uma camada residual na superfície ou por subestimar o armazenamento de calor no dossel.

Mais recentemente, Imbuzeiro (2005) realizou uma nova calibração e validação dos parâmetros do modelo IBIS, utilizando medidas micrometeorológicas coletadas nos sítios experimentais do projeto LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia). Para o procedimento de calibração, buscou-se a otimização dos coeficientes de correlação, inclinação da reta de regressão entre os dados simulados e os observados, a minimização do erro relativo e a minimização da raiz do erro quadrado médio (RMSE). Embora os resultados simulados pelo modelo tenham-se ajustado bem aos dados observados em todos os sítios, o modelo não simulou o fluxo de calor no solo satisfatoriamente. Este foi, provavelmente, superestimado devido ao modelo não considerar uma camada residual na superfície, a qual poderia controlar fortemente a troca de energia e de água entre a superfície do solo e a atmosfera, ou pela subestimativa do calor absorvido pelo dossel.

Os parâmetros do modelo SSiB foram validados e posteriormente calibrados para sítios de pastagem e de floresta, situados no Estado de Rondônia, por Correia et al. (2005). Foram utilizadas medidas micrometeorológicas e hidrológicas obtidas durante o período seco de 2001, no escopo do projeto LBA. Os resultados indicaram que o modelo simulou bem o saldo de radiação, tanto na pastagem quanto na floresta. O fluxo de calor latente foi superestimado nos dois sítios nos períodos de simulação, o que deve estar relacionado aos parâmetros utilizados no cálculo dessa variável. O modelo subestimou o

fluxo de calor sensível na pastagem e na floresta, principalmente no período noturno; porém, para a floresta, os valores foram mais próximos daqueles observados. Com os parâmetros ajustados, melhores estimativas dos fluxos de calor latente e de calor sensível foram geradas e, conseqüentemente, as partições de energia na floresta e na pastagem foram melhores representadas pelo modelo.

Kahan et al. (2006) realizaram uma série de experimentos para compreender a interação solo-vegetação-atmosfera no Sahel e encontrar os principais parâmetros que são cruciais para simular os processos no clima semi-árido. Para isto, utilizaram dados observacionais dos experimentos SEBEX (Sahelian Energy Balance Experiment) e do HAPEX-Sahel (Hydrological Atmospheric Pilot Experiment) e o esquema de superfície SSiB na versão off-line. Nas simulações de controle, considerando-se os parâmetros padrões da classe tipo 8 do modelo SSiB (“shrubs with ground-cover”), o modelo subestimou o fluxo de calor latente e superestimou o fluxo de calor sensível. Antes do processo de calibração, realizou-se um estudo de sensibilidade a fim de se identificar os parâmetros mais importantes que afetam as simulações no Sahel e seus papéis na interação superfície-atmosfera, cujos resultados mostram que o índice de área foliar, a resistência estomática, a difusividade térmica do solo e a condutividade hidráulica à saturação são os parâmetros que mais influenciam as simulações dos fluxos turbulentos no Sahel. Após a calibração desses parâmetros, as diferenças entre os fluxos observados e calculados foram substancialmente reduzidas.

2.3 Os processos de superfície

Os esquemas de superfície consideram que as variações nas condições das superfícies continentais influenciam a circulação atmosférica, modificando o balanço de energia à superfície, o ciclo hidrológico e o transporte de momentum. Assim, faz-se necessário distinguir e conhecer os processos básicos das superfícies continentais.

2.3.1 Balanço de energia à superfície

O balanço de energia à superfície determina a quantidade de fluxo de energia disponível para a evaporação da água e para a variação da temperatura da superfície sendo, portanto, mais complexo que no topo da atmosfera, já que considera os fluxos de energia e de umidade por condução e por convecção no movimento dos fluidos, os quais dependem basicamente da insolação, das características da superfície tais como umidade, cobertura vegetal e albedo, e do estado da atmosfera (Correia, 2000).

Com relação aos fluxos radiativos, a radiação solar é a principal fonte de calor para a superfície e para a fotossíntese das plantas. Da radiação solar que incide sobre uma superfície vegetada, parte dela é refletida de volta para o espaço, outra parte é absorvida pelo dossel e eventualmente pelo solo, contribuindo para o seu aquecimento. O saldo de radiação para a superfície de um dossel pode ser obtido pela soma dos fluxos de radiação de ondas curtas e de ondas longas, escrito na seguinte forma:

$$R_N = (K \downarrow - K \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow) \quad (2.1)$$

em que $K \downarrow$ é a radiação solar global incidente, $K \uparrow$ é a radiação solar global refletida pela superfície, $L \downarrow$ é a radiação de onda longa proveniente da atmosfera e $L \uparrow$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície.

2.3.1.1 Fluxos turbulentos de calor latente e de calor sensível

Os fluxos de calor latente e de calor sensível são fluxos não radiativos, determinados tanto pelas trocas de energia que a superfície realiza com a atmosfera quanto pelos movimentos turbulentos próximos à superfície. Assim, convecção e fatores mecânicos determinam a intensidade desses movimentos. Esses fatores mecânicos são causados pelo cisalhamento do vento em superfície e sua respectiva rugosidade.

O fluxo de calor latente relaciona-se com a energia liberada ou absorvida pelas mudanças de fase da água quando, respectivamente, ocorrem a transpiração das plantas (evaporação de água implica em absorção de calor) e a formação de nuvens (condensação do vapor d'água implica em liberação de calor). Em termos quantitativos, o fluxo de calor latente é proporcional à diferença entre as concentrações de vapor d'água da superfície e do ar.

Os mecanismos envolvidos na perda de água através da transpiração das plantas são chamados processos do dossel e sua descrição requer a agregação de processos desde as escalas espaciais celulares até aquelas de grande escala, como os processos das copas das árvores. Do ponto de vista celular, as folhas perdem água primariamente por pequenas cavidades (tipicamente com comprimento de 15 microns) chamadas estômatos (Dickinson, 2002).

A perda de água pela transpiração não é controlada apenas por processos internos da planta, mas também por processos externos. O arranjo das folhas e das estruturas que as suportam (ramos e caules) integrado à altura entre o solo e o topo da vegetação define um dossel. Uma forma típica de quantificar o dossel é em termos do índice de área foliar – LAI (“leaf area index”), computado como a razão entre a área total de folhas por unidade de área superficial. Em geral, o LAI varia zonalmente no globo, atingindo máximos na região do Equador e mínimos próximos aos pólos.

O fluxo de calor sensível, por sua vez, está relacionado com o transporte de energia atmosférica seca, quando a energia é levada para cima juntamente com o ar mais quente, enquanto o ar mais frio afunda. Através de movimentos turbulentos próximos à superfície, esse transporte de energia atmosférica seca resulta na convecção diurna que gera a turbulência necessária na camada limite para remover a energia armazenada durante o dia. Esse fluxo é quantitativamente proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e a atmosfera. A razão entre os fluxos de calor sensível e latente é chamada de razão de Bowen.

2.3.2.1 Fluxo de calor no solo

No solo, a transferência de calor ocorre primariamente por condução e uma pequena parte por convecção, através de moléculas de vapor d'água e ar que ocupam os espaços porosos do solo. Por outro lado, a perda de energia do solo para a atmosfera dá-se por radiação. Segundo Hartmann (1994), o fluxo de calor por condução no solo é proporcional ao gradiente vertical de temperatura do solo e as propriedades térmicas do solo são afetadas por fatores como conteúdo de água no solo, estrutura e composição do solo.

Em estudos de balanço de energia a quantificação do fluxo de calor no solo torna-se importante, pois representara a entrada/saída de energia de determinado meio, contribuindo, assim, para o aumento e/ou redução nos fluxos de calor latente e sensível e, conseqüentemente, aumentar e/ou reduzir as taxas de evaporação e transpiração (Galvani, 2001).

2.3.2 Balanço hídrico

No sistema terra-atmosfera, o balanço de água é bastante simples. Desde que não haja fontes ou sumidouros de água na atmosfera ou no espaço exterior, toda a água que evapora tem que precipitar em algum lugar. Por essa razão, a água circula continuamente entre a atmosfera e os grandes reservatórios na superfície terrestre (oceanos, lagos, etc).

O impacto da vegetação no balanço de água na superfície também é importante, uma vez que 10 a 40% da precipitação que incide numa superfície vegetada pode ser interceptada pelo dossel e re-evaporada sem atingir o solo, dependendo da intensidade e da duração da chuva, da estrutura e do tamanho da cobertura vegetal, da forma e da orientação das folhas. Além da interceptação reduzir a precipitação efetiva no solo, o sistema radicular facilita a infiltração da precipitação no solo, reduzindo, portanto, o escoamento superficial. Assim sendo, em comparação com o solo nu, uma superfície vegetada é mais eficiente no processo de evapotranspiração, pois o sistema radicular das

plantas extraí água de uma camada de solo mais profunda para o processo de transpiração, que ocorre durante a fotossíntese, quando a planta através das folhas absorve CO₂ e libera vapor d'água. Ao longo prazo, o processo de transpiração (de uma superfície vegetada) é mais eficaz que o da evaporação direta do solo (para superfícies desnudas), porque no primeiro caso as plantas dispõem de um reservatório de água no solo maior. Logo, a cobertura vegetal desempenha um papel muito importante no ciclo hidrológico (Costa, 1997).

2.3.3 O transporte de momentum

As superfícies dos continentes, e em particular as áreas cobertas por florestas, atuam como fortes absorvedores de momento devido à turbulência provocada pelo atrito do ar com os elementos de rugosidade da superfície. Isso causa uma troca das parcelas de ar que possuem pouca quantidade de momento com outras de momento maior. A eficiência da turbulência depende da altura da rugosidade e da velocidade do escoamento de ar próximo à superfície (Costa, 1997).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se neste Capítulo informações sobre a caatinga nordestina, bem como informações mais detalhadas sobre o sitio experimental, os dados e a metodologia necessária para a calibração e validação do modelo simplificado da biosfera (SSiB) de Xue et al. (1991). O esquema de superfície SSiB foi elaborado para simular as interações entre as superfícies continentais e a atmosfera, descrevendo os processos de transferência radiativa, turbulência e o controle biofísico da evapotranspiração, baseado nos processos de interação continente – atmosfera, sendo apropriado tanto para aplicações globais quanto regionais.

3.1 O bioma Caatinga

O termo caatinga é de origem indígena e significa mata clara e aberta. A Caatinga é um bioma típico do sertão do Nordeste brasileiro, estendendo-se pelo domínio de climas semi-áridos (precipitação anual é inferior a 800mm), numa área de aproximadamente 800.000 km², correspondente a 9,92% do território nacional (IBGE, 2003). Ocupa os Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia e norte de Minas Gerais.

A formação vegetal da caatinga tem características bem definidas, com árvores baixas e arbustos que, em geral, perdem as folhas na estação seca (caducifólias) para reduzir a transpiração e a perda de água da planta, tornando a florescer no período chuvoso. O aspecto geral da caatinga no período seco é de mata espinhosa. As plantas possuem adaptações ao clima tais como folhas transformadas em espinhos, cutículas altamente impermeáveis e caules suculentos. Segundo Oliveira et al. (2006), todas essas adaptações lhes conferem um aspecto característico denominado xeromorfismo (do grego xeros=seco, e morphos=forma).

A região do bioma caatinga no Brasil é caracterizada por apresentar uma forte irregularidade climática, apresentando os valores meteorológicos mais extremos do país: a mais forte insolação, a mais baixa nebulosidade, as mais altas médias térmicas, as

mais elevadas taxas de evaporação e, sobretudo os mais baixos índices pluviométricos, em torno de 500 a 700 mm anuais, com grande variabilidade espacial e temporal (Oliveira et al., 2006). O principal mecanismo responsável pela precipitação sobre a região do Nordeste Brasileiro (NEB), a qual se caracteriza pela presença de caatinga em grande parte de sua área, é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que atinge sua posição mais austral, cerca de 4° S, durante o outono (de março a abril). Todavia, aspectos meteorológicos em escala global podem acentuar ou inibir o desempenho de sistemas como a ZCIT. Em anos de seca no norte do Nordeste, a ZCIT fica mais ao norte em relação a sua posição normal, de forma que a região fica sob subsistência, a qual, por sua vez, inibe a precipitação. Em anos chuvosos, a ZCIT atinge cerca de 5° S e torna-se mais intensa com o aumento da convergência (Souza, 2006). Contudo, a posição de atuação e a intensidade da ZCIT são determinantes na duração e na intensidade da estação chuvosa na região.

A variabilidade na distribuição da precipitação na região Nordeste do Brasil determina a distribuição de água no solo, a qual é um fator determinante para as trocas de energia e de CO₂ entre o ecossistema e a atmosfera. Dessa forma, considerar medidas micrometeorológicas representativas do bioma caatinga possibilita estudar o comportamento das mais diversas variáveis que governam o clima da região semi-árida, além de determinar de que forma as características ou os parâmetros da vegetação e do solo influenciam as trocas turbulentas. No entanto, como não existiam medidas micrometeorológicas feitas em área de caatinga no Brasil, os parâmetros de superfície iniciais considerados no modelo de superfície SSiB acoplado aos modelos meteorológicos são obtidos da classificação 8 do modelo SiB (Sellers et al. 1989), uma vez que esse bioma é o que mais se assemelha ao da caatinga do NEB. Entretanto, tais parâmetros discriminados no modelo referem-se à vegetação da savana-estépica africana, a qual segundo especialistas das áreas de botânica, pedologia e geologia, diferem consideravelmente da caatinga brasileira.

3.2 Sítio experimental e dados

O sítio experimental ($9^{\circ}03'30,6''\text{S}$; $40^{\circ}19'45,1''\text{W}$) onde foram realizadas as medidas meteorológicas e de fluxos de superfície localiza-se na área experimental da Embrapa - Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido – CPATSA (Figura 3.1). Os dados utilizados no trabalho, representativos do bioma caatinga, foram coletados entre julho de 2004 e setembro de 2005.

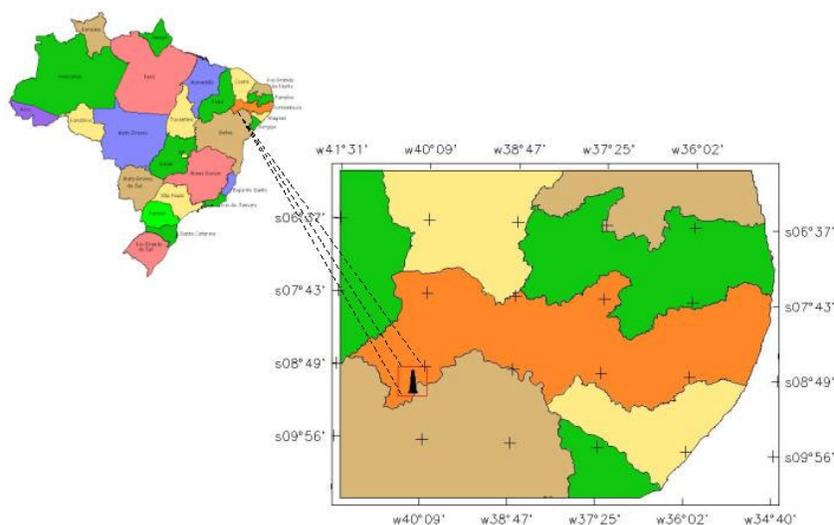


Figura 3.1 – Localização geográfica da torre micrometeorológica instalada na Embrapa Semi-Árido em Petrolina, PE.

A Embrapa Semi-Árido está instalada no município de Petrolina, no Estado de Pernambuco. O município fica no Sub-médio São Francisco, ao lado de Juazeiro, Bahia. A unidade fica localizada a 42 km da sede do município de Petrolina, na rodovia que o liga à cidade do Recife e a 350 m acima do nível do mar. Essa é uma área de 600 ha de vegetação de caatinga nativa, na qual predomina uma vegetação de caráter espinhento e folhas pequenas com árvores de aproximadamente 4,5 metros de altura, pertencentes à família Leguminosae (*Mimosa tenuiflora*), sendo verificado também a presença de árvores, à distância, com alturas de até 8 metros (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Foto ilustrativa das condições de pista a leste da torre micrometeorológica instalada na Embrapa Semi-Árido em Petrolina, PE.

A precipitação na região apresenta grande variabilidade espacial e temporal. Em termos de médias mensais, para um período de 30 anos de medidas obtidas por uma estação meteorológica convencional em um campo experimental dentro da EMBRAPA/SEMI-ÁRIDO (Figura 3.3), observa-se que a precipitação concentra-se nos meses de novembro a abril, o que indica claramente a existência de uma estação seca intensa e duradoura. A temperatura média mensal situa-se entre 24 e 28 °C com pequena variabilidade ao longo do ano, assim como a umidade relativa. O solo da área experimental de estudo é classificado como Argissolo Amarelo (PA), com baixa retenção de água e pobre fertilidade (Oliveira et al., 2006).

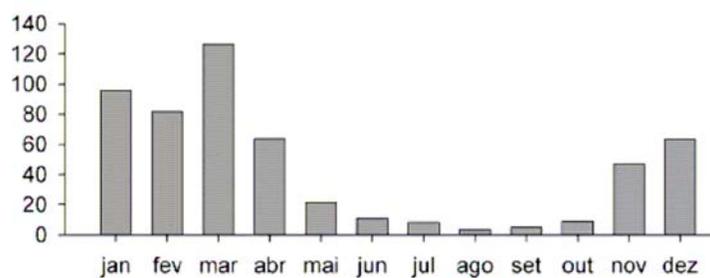


Figura 3.3 – Precipitação pluviométrica média mensal (mm) da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina-PE 09°09' S 40°22' W). Período 1975-2004.

Fonte: Oliveira et al. (2006).

Em junho de 2003 foi estabelecido nesta área um experimento, no escopo do Projeto CT-HIDRO, o qual é um estudo de modelagem sobre o papel da umidade do solo na melhoria das previsões de tempo e de clima para a América do Sul, tendo como objetivo principal melhorar a representação de processos em modelos numéricos de tempo e de clima, com a finalidade de melhorar a previsão em regiões onde a umidade de solo pode ter um impacto significativo na simulação de chuva. Uma torre com 9 m de altura (Figura 3.4), foi instalada no local do experimento para suporte de sensores eletrônicos de alta frequência, para medidas de turbulência, e instrumentos eletrônicos de baixa frequência, para medidas de diversas variáveis meteorológicas.



Figura 3.4 – Torre micrometeorológica instalada na área da Embrapa Semi-Árido em Petrolina, PE.

Os dados meteorológicos necessários para a calibração dos parâmetros do modelo SSiB são a precipitação pluvial, a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a velocidade e direção do vento e a radiação solar global. Para a validação dos fluxos de superfície, calculados com os parâmetros calibrados, foram utilizadas medidas de saldo de radiação (R_n), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G).

Para medidas de velocidade e direção do vento foi utilizado um anemômetro sônico (CS8000, R. M. Young, Traverse City, Michigan, EUA). Um termohigrômetro (HMP45C-Vaisala, Helsinki, Finlândia) foi usado para medir a temperatura e a umidade do ar. A precipitação pluviométrica foi medida por pluviômetro (TB4, Hydrological Services, Edmonton, Canadá). Para a medida de pressão atmosférica utilizou-se um sensor de pressão (CS105, Vaisala). Um piranômetro foi utilizado para a medição da radiação de onda curta (CM6B, Kipp & Zonen, Delft, Holanda). Além disso, medidas da radiação de onda longa incidente e emitida pela superfície foram obtidas por um pirgeômetro (CG1, de Kipp & Zonen), enquanto o saldo de radiação foi obtido através de um saldo-radiômetro (NR da Lite, Kipp & Zonen). A temperatura no solo foi monitorada por perfiladores (ST01, Hukseflux, Delft, Holanda) medindo nas profundidades de 0,02; 0,05; 0,10; 0,20 e 0,50m, enquanto a umidade do solo foi medida nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60 e 1,0m utilizando-se também um perfilador delta T (PR1, Delta-T, Cambridge, Reino Unido). Medidas do fluxo de calor no solo a uma profundidade de 5 cm foram obtidas por placas de fluxo (HFP01, Hukseflux). Os dados desses sensores foram lidos a cada minuto e seus valores médios e totais a cada 10 minutos foram armazenados em um coletor de dados (CR23X, Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA). A Tabela 3.1 sumariza as grandezas medidas no sítio experimental.

Tabela 3.1 – Grandezas medidas no experimento e os respectivos instrumentos

Variáveis	Instrumentos	Acurácia	Altura(m)
Velocidade e direção do vento	Anemômetro sônico CS8000, R. M. Young	$u_x, u_y < \pm 4 \text{ cm s}^{-1}$ $u_z < \pm 2 \text{ cm s}^{-1}$	11
Umidade e temperatura do ar	Termohigrômetro HMP45C, Vaisala	$\pm 3\%$ a 20°C	9
Precipitação pluviométrica	Pluviômetro TB4, Hydrological Services	+ 2%	9
Pressão atmosférica	Sensor de pressão CS105, Vaisala	$\pm 2 \text{ mb}$, 0°C a 40°C	9
Radiação de onda curta	Piranômetro CM6B, Kipp & Zonen	$< \pm 20 \text{ Wm}^{-2}$	9
Radiação de onda longa	Pirgeômetro CG1, Kipp & Zonen	$\pm 10\%$	9
Saldo de radiação	Saldo radiômetro NR Lite, Kipp & Zonen	$< \pm 30 \text{ Wm}^{-2}$	9
Temperatura no solo	Perfilador ST01, Hukseflux	$\pm 0,15^\circ\text{C}$	-0,02; -0,05; -0,10; -0,20 e -0,50
Umidade do solo	Perfilador PR1, Delta-T	$\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 0°C a 40°C	-0,10; -0,20; -0,30; -0,40 e -0,60
Fluxo de calor no solo	Placa de fluxo de calor HFP01, Hukseflux	+5/ -5%	-0,05
Concentrações de vapor de água e de CO_2	Analizador de CO_2 e H_2O LI7500, Licor	$\pm 0,225 \text{ g/m}^3$ (-25° a 50°C)	11

Medidas de alta frequência das componentes do vento, temperatura do ar, concentrações de vapor de água e de dióxido de carbono foram realizadas com o sistema de covariância dos vórtices turbulentos (“eddy correlation”), compostos por um analisador de CO_2 e H_2O de caminho aberto (LI7500, Licor, Lincoln, Nebraska, EUA) e um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell), os quais foram instalados no topo de um mastro acoplado na torre, à uma altura de 11 metros. A distância da torre até a borda mais próxima da área de caatinga é de 1000 m, 100 vezes a altura do sistema de medidas de fluxo, o que garante com uma margem de segurança satisfatória que os fluxos medidos sejam originados apenas de áreas de caatinga, mesmo durante condições estáveis. Os dados de alta frequência foram lidos a cada 0,0625 segundos (16 Hz) por um coletor de dados (CR10X, Campbell) e armazenados em um computador portátil. Posteriormente esses dados foram processados por Oliveira et al. (2006) para o cálculo

dos fluxos de calor latente, de calor sensível e de dióxido de carbono, utilizando a técnica da covariância dos vórtices turbulentos. Para tal foi utilizado um programa escrito em linguagem Fortran (programa “*Eddyinpe*”), que foi desenvolvido no Alterra, Holanda, e adaptado no CPTEC/INPE para o sistema instalado na Caatinga. O programa calcula as flutuações turbulentas em intervalos de 30 minutos, realizando uma série de correções necessárias para a estimativa dos fluxos, conforme a metodologia sugerida por Aubinet et al. (2000). Para o cálculo das covariâncias, as flutuações dos valores medidos foram calculadas a partir de médias em blocos de 800 s, após a retirada de valores espúrios. Aplicou-se a rotação de coordenadas dos vetores de vento e correções de resposta de frequência eram feitas de acordo com o método descrito por Moore (1986) enquanto as correções das covariâncias e variâncias, devido às flutuações de umidade, foram feitas de acordo com a metodologia de Schotanus e de Bruin (1983).

3.3 O esquema de superfície – SSiB

O modelo SiB foi primeiramente apresentado por Sellers et al. (1986) e representou um grande avanço na modelagem da superfície continental. Ele é do ponto de vista biofísico, um modelo realista, por basear-se nos processos físicos de interação continente-atmosfera.

No modelo SSiB foram introduzidas quatro modificações principais: i) a parametrização do ciclo diurno do albedo foi simplificada, substituindo a metodologia “two-stream” por uma aproximação de dependência quadrática com o ângulo zenital; ii) simplificação da dependência da resistência estomática em relação à umidade do solo na zona de raízes; iii) os fluxos de calor, umidade e momentum entre o dossel e a atmosfera foram parametrizados com base em uma linearização derivada a partir da teoria de similaridade de Monin-Obukhov; iv) o número de camadas de vegetação foi reduzido de dois para um.

No esquema de superfície SSiB são considerados os seguintes processos físicos (Xue et al., 1991):

- a) Absorção seletiva da radiação fotossinteticamente ativa (PAR);
- b) Resistência estomática das raízes aos fluxos de vapor d'água entre o solo e a atmosfera;
- c) Armazenamento, drenagem e evaporação da precipitação e do orvalho interceptados pela superfície das folhas;
- d) Escoamento do excesso de precipitação e drenagem sub-superficial da água;
- e) Efeitos radiativos e térmicos da cobertura de neve no solo e no dossel da vegetação;
- f) A influência das diferenças morfológicas das plantas no comprimento de rugosidade e na transferência de momento, calor e umidade entre a superfície e a atmosfera.

A cobertura do terreno sobre a qual o modelo opera é representada em um mapa, em que cada classe de cobertura da superfície é representada por um número (bioma) segundo a classificação introduzida por Dorman e Sellers (1989), a qual é determinada em associação a parâmetros morfológicos, fisiológicos e físicos (Tabela 3.2). Na versão simplificada o número de parâmetros foi reduzido de 40 para 23. Os 23 parâmetros do SSiB descrevem as propriedades físicas e fisiológicas da vegetação e do solo, incluindo propriedades óticas e morfológicas da vegetação, bem como propriedades térmicas e hidráulicas do solo. Muitos desses parâmetros são dados em Willmott e Klink (1986) e em Dorman e Sellers (1989). Alguns parâmetros que variam sazonalmente, como o índice de área foliar (Lc) e a fração de folha verde (Nc), são descritos em Klink e Willmott (1985).

Tabela 3.2 – Parâmetros morfológicos, fisiológicos e físicos do modelo SSiB

Tipo de parâmetro	Símbolo	Definição
Morfológicos	V_c	<i>Fração de cobertura vegetal</i>
	χ_L	<i>Distribuição do ângulo da folha</i>
	Z_2	<i>Altura do topo do dossel</i>
	L_c	<i>Índice de área foliar</i>
	Z_d	<i>Profundidade das raízes</i>
	D_1, D_2, D_3	<i>Espessura das 3 camadas do solo</i>
Fisiológicos	N_c	<i>Fração de folha verde</i>
	a, b, c	<i>Coefficientes de resistência estomática à radiação PAR</i>
	T_L, T_h, T_o	<i>Temperaturas mínima, máxima e ótima para o funcionamento dos estômatos</i>
	h_5	<i>Parâmetro do déficit de pressão de vapor d'água</i>
	C_1, C_2	<i>Parâmetro governante da resposta estomática ao potencial de água na folha</i>
Físicos	Z_0	<i>Comprimento de rugosidade</i>
	d	<i>Deslocamento do plano zero</i>
	θ_s	<i>Porosidade do solo</i>
	ψ_s	<i>Potencial de umidade no solo à saturação</i>
	B	<i>Parâmetro que relaciona a umidade volumétrica do solo e o potencial de umidade no solo</i>
	α	<i>Inclinação</i>
	C_d	<i>Parâmetro para a resistência aerodinâmica entre o ar abaixo do dossel e a superfície (rd)</i>
	C_b	<i>Parâmetro para a resistência da camada limite (rb)</i>
K_s	<i>Condutividade hidráulica à saturação</i>	

Concernente à vegetação, o mapa utilizado pelo modelo SSiB é derivado do esquema de classificação fisionômica de Kuchler (1983), em que alguns tipos de vegetação que são considerados como sendo homogêneos com relação aos valores de seus parâmetros são agregados (Sellers et al., 1986; Dorman e Sellers, 1989). O mapa utilizado pelo SSiB é uma forma generalista do esquema de Kuchler, totalizando 12 classes de cobertura do terreno, incluindo drenagem e solo exposto. Através dos parâmetros morfológicos, fisiológicos e físicos do modelo SSiB, o mapa de vegetação é caracterizado seguindo a Tabela 3.3. Dorman e Sellers (1989) discutem a metodologia utilizada na determinação dos 12 tipos de bioma e apresentam a climatologia global do albedo, comprimento de rugosidade e resistência do dossel geradas pelo modelo SiB original. Ressalta-se que o

bioma 6, representativo da savana, também é considerado no modelo como o bioma cerrado. No caso do esquema SSiB acoplado aos modelos meteorológicos do CPTEC/INPE, as áreas desmatadas da região amazônica são consideradas como pastagens, cujos parâmetros do esquema foram calibrados por Correia et al. (2005).

Tabela 3.3 - Classificação dos Biomas Segundo Dorman e Sellers (1989).

Bioma	Características
0	Gelo perpétuo
1	Árvores latifoliadas perenes (florestas tropicais)
2	Árvores latifoliadas decíduas (floresta temperada)
3	Árvores latifoliadas/aciculadas (floresta mista)
4	Árvores aciculadas perenes (floresta conífera)
5	Árvores aciculadas decíduas (floresta de lariços)
6	Árvores latifoliadas com cobertura arbustiva/herbácea (savana)
7	Arbustos (campos extratropicais)
8	Arbustos latifoliados com cobertura herbácea (caatinga)
9	Arbustos latifoliados com solo exposto (semi-deserto)
10	Árvores anãs e arbustos com cobertura herbácea (tundra)
11	Solo exposto (deserto)
12	Cultivos (parâmetros iguais aos do tipo 7)*

* winter wheat and broadleaf – deciduous trees no trabalho de Dorman e Sellers (1989).

As características morfológicas e fisiológicas da vegetação são usadas para calcular os coeficientes e as resistências que governam os fluxos de momentum, radiação, calor sensível e latente (vapor d'água) entre a superfície e a atmosfera. Todos esses fluxos dependem do estado da superfície vegetada e das condições da atmosfera.

3.3.1 Estrutura do modelo SSiB

A determinação dos fluxos de energia é feita segundo uma analogia com a Lei de Ohm, supondo os fluxos de calor proporcionais à diferença de potencial e ao inverso de uma resistência especificada. A estrutura do modelo SSiB é mostrada na Figura 3.5. As resistências aerodinâmicas r_a , r_b e r_d estão associadas à transferência turbulenta de

umidade e calor, ao passo que as resistências de superfície r_c e r_{surf} controlam o fluxo de vapor d'água dos tecidos saturados da folhagem e a evaporação do solo nu. A estrutura vertical do solo é dividida em três camadas adjacentes: i) superficial - é pouco espessa e favorece a evaporação direta do solo; ii) de raízes - responsável pela fonte de umidade para a transpiração da vegetação; iii) profunda ou de drenagem - promove o escoamento da água por drenagem gravitacional.

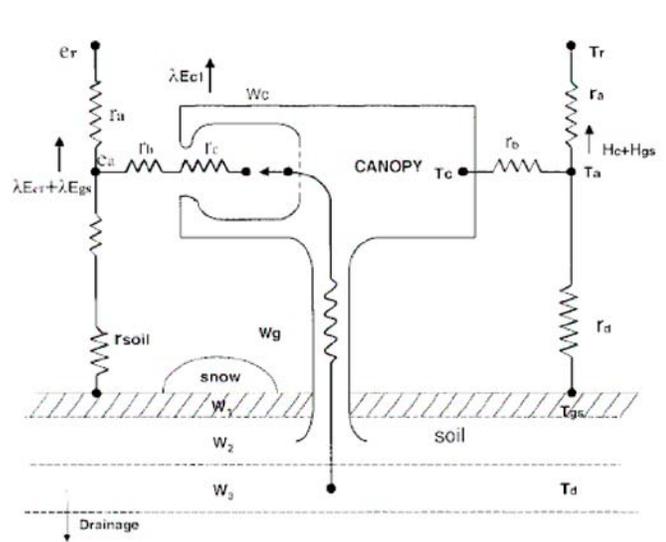


Figura 3.5 - Diagrama esquemático do modelo SSiB. T_r é a temperatura do ar na altura de referência, T_c a temperatura do dossel, T_a a temperatura do ar dentro do dossel, T_g a temperatura do solo, r_a a resistência aerodinâmica entre o ar do dossel e a altura de referência, r_b a resistência totalizadora da camada limite, r_c a resistência estomática, e r_d aerodinâmica entre o ar do dossel e o solo.

Fonte: Xue et al. (2001).

3.3.2 Principais Equações do Modelo SSiB

O modelo SSiB tem como variáveis prognósticas: a temperatura do dossel da vegetação, T_c , da superfície do solo, T_{gs} , e do solo profundo, T_d ; armazenamento de água por

interceptação do dossel, M_c ; e o grau de saturação em cada camada do solo W_1 , W_2 , W_3 . As equações prognósticas de temperatura são dadas pelas relações:

$$C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = Rn_c - H_c - \lambda E_c \quad (3.1)$$

$$C_{gs} \frac{\partial T_{gs}}{\partial t} = Rn_{gs} - H_{gs} - \lambda E_{gs} - G_{gs} \quad (3.2)$$

$$C_{gs} \frac{\partial T_d}{\partial t} = 2(Rn_{gs} - H_{gs} - \lambda E_{gs} - G_{gs}) / (365\pi)^{1/2} \quad (3.3)$$

em que Rn_c e Rn_{gs} são os fluxos de saldo de radiação no dossel e no solo, respectivamente; H_c e H_{gs} são os fluxos de calor sensível a partir do dossel e da superfície do solo, respectivamente; λE_c e λE_{gs} são os fluxos de calor latente no dossel e na superfície do solo, respectivamente; G_{gs} é o fluxo de calor no solo; C_c e C_{gs} são as capacidades caloríficas da vegetação e do solo, respectivamente; e λ é o calor latente de vaporização.

Os fluxos de calor sensível e de calor latente no dossel e no solo são dados por:

$$H_c = \frac{2(T_c - T_a)}{r_b} \rho c_p \quad (3.4)$$

$$H_{gs} = \frac{(T_{gs} - T_a)}{r_d} \rho c_p \quad (3.5)$$

$$\lambda E_c = (e_*(T_c) - e_a) \rho \frac{c_p}{\gamma} \left[\frac{W_c}{r_b} + \frac{1 - W_c}{r_b + r_c} \right] \quad (3.6)$$

$$\lambda E_{gs} = (f_h e_*(T_{gs}) - e_a) \rho \frac{c_p}{\gamma} \left[\frac{1}{r_{sup} + r_d} \right] \quad (3.7)$$

sendo T_a a temperatura no espaço do ar do dossel; T_c a temperatura do dossel; ρ é a massa específica; c_p é o calor específico; e_a é a pressão de vapor no dossel; $e_*(T_c)$ é a pressão de vapor de saturação à temperatura T_c ; $e_*(T_{gs})$ é a pressão de vapor de saturação à temperatura T_{gs} ; f_h é a umidade relativa do ar na superfície; γ é a constante psicrométrica; W_c é a fração da caixa de grade coberta por vegetação; r_d é a resistência aerodinâmica entre a superfície e o espaço do ar do dossel e r_{surf} é a resistência da superfície, definida por:

$$r_{surf} = a_s (1 - W_1^{bs}) \quad (3.8)$$

em que a_s e b_s são constantes e W_1 a umidade na primeira camada do solo. O saldo de radiação à superfície é dado pela soma dos termos R_{nc} e R_{ngs} , que se referem às componentes do dossel e da superfície, respectivamente, definidas por:

$$R_{nc} = F_c - 2\sigma_s T_c^4 V_c \delta_t + \sigma_s T_{gs}^4 V_c \delta_t \quad (3.9)$$

$$R_{ngs} = F_{gs} - \sigma_s T_{gs}^4 + \sigma_s T_c^4 V_c \delta_t \quad (3.10)$$

e F_c e F_{gs} são as somas das radiações de ondas curtas e longas absorvidas pelo dossel e pela superfície, respectivamente, σ_s é a constante de Stefan-Boltzmann, V_c é a fração da cobertura vegetal, δ_t é a transmitância da radiação infravermelha termal para o dossel.

O fluxo de calor no solo, G_{gs} , é definido supondo-se o solo como uma camada homogênea e isotérmica com temperatura profunda T_d e de capacidade calorífica variável com o conteúdo de água presente na camada superficial do solo, obtendo-se:

$$G_{gs} = \frac{2\pi C_{gs}}{\tau} (T_{gs} - T_d) \quad (3.11)$$

em que τ é a duração do dia em segundos (86400 s).

A equação prognóstica do armazenamento de água devido à interceptação da precipitação (M_c) é dada pela relação:

$$\frac{\partial M_c}{\partial t} = P_c - D_c - \frac{E_{wc}}{\rho_w} \quad (3.12)$$

em que P_c , D_c e E_{wc} são as taxas de precipitação efetiva sobre o dossel, de drenagem do dossel e de evaporação da porção úmida da vegetação, respectivamente e ρ_w é a massa específica da água. A taxa de evaporação da porção úmida da vegetação é dada por:

$$\lambda E_{wc} = \frac{[e(T_c) - e_a] \rho_c p}{r_b \gamma} \quad (3.13)$$

As equações governantes para a umidade do solo W_1 , W_2 e W_3 nas três camadas são:

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_1} \left[P_1 - Q_{12} - \frac{1}{\rho_w} (E_{gs} + b_1 E_{dc}) \right] \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_2} \left[Q_{12} - Q_{23} - \frac{1}{\rho_w} (b_2 E_{dc}) \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial W_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_3} [Q_{23} - Q_3] \quad (3.16)$$

E_{dc} é a transpiração do solo, θ_s é a umidade volumétrica do solo à saturação, D_1 , D_2 e D_3 são as profundidades das três camadas do solo. $Q_{i,j}$ é a transferência de água entre as i -ésima e j -ésima camadas e, é definida como:

$$Q_{i,j} = -k \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right] \quad (3.17)$$

em que k é a condutividade hidráulica do solo, ψ é o potencial de água no solo, e z é a espessura entre duas camadas do solo. O potencial de água no solo no esquema SSiB é calculado através de uma relação empírica de Clapp e Hornberger (1978),

$$\psi = \psi_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-B} \quad (3.18)$$

em que o parâmetro B é uma constante empírica que depende do tipo de solo. A condutividade hidráulica do solo na camada i , k_i , é:

$$k_i = k_s \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^{(2B+3)} \quad (3.19)$$

em que k_s , é a condutividade hidráulica do solo à saturação.

A evaporação do solo é dada por:

$$\lambda E_{dc} = \frac{[e(T_c) - e_a]}{r_c + r_b} \frac{\rho c_p}{\gamma} (1 - W_c) \quad (3.20)$$

em que W_c é a fração de umidade do dossel. As temperaturas e a pressão de vapor d'água dentro do espaço do ar do dossel são determinadas pelas equações do balanço de energia:

$$H_c + H_{gs} = \frac{[T_a - T_r]}{r_b} \rho c_p \quad (3.21)$$

$$\lambda E_c + \lambda E_{gs} = \frac{[e_a - e_r]}{r_a} \frac{\rho c_p}{\gamma} \quad (3.22)$$

sendo T_r a temperatura do ar na altura de referência.

3.3.3 Transferência radiativa no dossel

O modelo SiB original usa a aproximação “two-stream” na representação da interceptação, reflexão, transmissão e absorção da radiação no interior do dossel, cujo esquema foi revisado por Dickinson (1983) e discutido em Sellers et al. (1986). Este método descreve os gradientes dos fluxos difusos verticais de radiação incidente e emergente no interior do dossel. Representa na prática a integração matemática dos processos de espalhamento e atenuação da radiação direta e difusa pela folhagem.

Assim, as propriedades ópticas de cada bioma são associadas às faixas do espectro da radiação fotossinteticamente ativa, radiação solar no infra-vermelho próximo (componentes direta e difusa) e da radiação terrestre do infra-vermelho termal (componente difusa). Um método numericamente mais eficiente para calcular o albedo foi desenvolvido por Xue et al. (1991) e implementado na versão simplificada (SSiB). O albedo da superfície é modelado com uma variação diurna, com o seu valor mínimo ocorrendo ao meio-dia local. Em virtude da variação do albedo com o ângulo solar ser bem regular, uma equação quadrática é utilizada para descrever sua variação diurna. A equação foi ajustada através dos resultados gerados pelo modelo de transferência radiativa “two stream”. A expressão para o albedo é da seguinte forma:

$$\mu = A \cos \xi + B \cos^2 \xi + C \delta + D \delta^2 + E \quad (3.23)$$

Os coeficientes da equação quadrática (A, B, C, D e E) dependem do tipo de vegetação, sendo ξ o ângulo zenital e δ a fração de cobertura de neve

3.4 Testes de sensibilidade no esquema SSiB

A análise de sensibilidade é uma ferramenta que pode ser utilizada a favor de uma modelagem mais eficiente, além de permitir concentrar os esforços experimentais nas variáveis mais importantes. Assim, nessa etapa, são realizadas uma série de testes de sensibilidade no esquema SSiB, a fim de determinar o conjunto de parâmetros fisiológicos e morfológicos que apresentou maior sensibilidade em relação aos processos de troca turbulentas, principalmente calor latente e calor sensível, entre a superfície e a atmosfera. Os testes foram realizados manualmente, isto é, cada parâmetro selecionado foi modificado para cada integração, enquanto os demais foram mantidos constantes. O mesmo procedimento foi repetido para outro parâmetro e assim sucessivamente. Considerou-se para isso, aumentos de 100% e reduções de 50% nos valores iniciais dos parâmetros da vegetação e do solo, exceto para o parâmetro fração de folha verde no dossel (N_c). Para o parâmetro N_c , foi considerado um aumento de 15% e redução de 99% em seu valor inicial. Após cada integração, analisaram-se as respostas que cada alteração em cada parâmetro ocasionou no saldo de radiação, nos fluxos de calor latente, de calor sensível e de calor no solo. Desta maneira, foi possível determinar os parâmetros que mais influenciam as simulações dos fluxos turbulentos na caatinga. Estudos de sensibilidade de parâmetros, similares aos realizados nesse estudo, foram feitos por Xue et al. (1996a;) e Xue et al. (1996b), utilizando dados meteorológicos obtidos na floresta Amazônica durante o projeto ABRACOS e no escopo do experimento HAPEX, respectivamente, por Sun et al. (2004), utilizando dados obtidos em um sítio de pastagem durante o experimento CHeRES (China Heavy Rainfall Experiment and Study) e por Kahan et al. (2006) para a caatinga africana.

3.5 Processo de calibração do esquema SSiB

Diversas metodologias para calibração de modelos de transferência de massa e energia entre o solo, a vegetação e a atmosfera têm sido propostas na literatura (Sellers et al. 1989, Imbuzeiro 2005). No procedimento de calibração deste trabalho utilizou-se o método que propõe a minimização da raiz do erro quadrado médio da razão $\lambda E/(H+\lambda E)$,

proposta inicialmente por Sellers et al. (1989) e, posteriormente, usado por outros autores (Rocha et al., 1996; Correia et al. 2005).

A versão “*off-line*” do Simplified Simple Biosphere Model – SSiB foi utilizada no processo de calibração visando gerar um conjunto de parâmetros que melhor representa os processos de troca entre a superfície e a atmosfera. Nessa versão, o modelo SSiB estava desacoplado do modelo atmosférico e foi forçado com dados observados. A calibração dos parâmetros do modelo SSiB foi realizada utilizando medidas micrometeorológicas e hidrológicas da área de caatinga, coletadas no período de julho de 2004 a junho de 2005 num sítio experimental localizado em Petrolina, Estado do Pernambuco. No procedimento de calibração, o modelo foi integrado a cada 30 minutos, e forçado com os seguintes dados observados: temperatura do ar (K), umidade específica do ar (g kg^{-1}), velocidade do vento (m s^{-1}), radiação solar incidente à superfície (Wm^{-2}), radiação de ondas longas proveniente da atmosfera (W m^{-2}), pressão atmosférica (mb) e precipitação pluvial (mm). Como não existiam medidas de campo dos parâmetros da vegetação e do solo feitas em área de caatinga no Brasil, os parâmetros iniciais necessários para a calibração foram obtidos da classificação 8 do modelo SiB (Sellers et al. 1989), uma vez que esse bioma é o que mais se assemelha ao da caatinga do NEB. O procedimento de calibração minimizou a diferença entre os fluxos calculados e os observados, a partir da otimização dos parâmetros que apresentara maiores incertezas ou nenhuma medida de campo associada.

Sellers et al. (1989) e Rocha et al. (1996) descrevem detalhadamente o método iterativo de otimização utilizado no presente trabalho, cujos passos principais de calibração são apresentados a seguir:

- a) Parâmetros provenientes da literatura (Sellers et al., 1989) foram utilizados para inicializar o modelo. O modelo SSiB foi integrado usando forçantes meteorológicas, como citado anteriormente para calcular os fluxos de superfície;
- b) A avaliação da qualidade da simulação foi feita considerando a diferença entre a fração de evaporação (fluxo de calor latente dividido pela soma do fluxo de calor latente

mais o fluxo de calor sensível) calculada e aquela observada, ponderada pelo valor absoluto do fluxo de calor latente, como seja:

$$F_i = \left\{ \left(\frac{\lambda E_i}{\lambda E_i + H_i} \right)_c - \left(\frac{\lambda E_i}{\lambda E_i + H_i} \right)_o \right\} x |\lambda E_i|_o \quad (3.24)$$

em que F_i é o desvio calculado a cada passo de tempo, λE_i e H_i são os fluxos de calor latente e sensível, respectivamente, também para cada passo de tempo. Os índices “c” e “o” correspondem aos valores calculados e observados, respectivamente. O uso da fração de evaporação como um discriminador assegura a estabilidade da otimização, quando não ocorre o fechamento do balanço de energia utilizando dados experimentais.

c) Os desvios em cada passo de tempo, são usados para calcular o desvio médio do erro:

$$\bar{F} = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N F_i^2 \right)^{1/2} \quad (3.25)$$

sendo N o número de medidas e \bar{F} pode ser considerado equivalente ao desvio médio no fluxo de calor latente calculado. Em seguida, utilizaram-se rotinas de minimização de mínimos quadrados da biblioteca MINPACK (Moré et al., 1980), com versões atualizadas de algumas das sub-rotinas por Burkardt (1998), para determinar numericamente as derivadas parciais de cada desvio, em relação aos parâmetros otimizados. Os parâmetros são alterados com a finalidade de reduzir o erro do modelo em relação aos fluxos de superfície. Quando o erro não pode ser mais reduzido, ou quando as derivadas parciais do desvio médio do erro caem abaixo de um valor especificado, finaliza-se a otimização, gerando um conjunto de parâmetros que fornecem o melhor ajuste.

No modelo SSiB, as características físicas, morfológicas e fisiológicas da vegetação são usadas para derivar os coeficientes e as resistências que governam as transferências de momentum, de radiação e dos fluxos de calor sensível e de calor latente através do

sistema solo-planta-atmosfera. Essas características são representadas através de parâmetros, tais como: índice de área foliar, distribuição do ângulo da folha, fração de folha verde, entre outros. Como muitos dos parâmetros do esquema variam sazonalmente, o procedimento de calibração dos parâmetros sazonais foi realizado para cada mês do ano, a fim de se obter um conjunto de parâmetros que melhor represente a variação sazonal das trocas entre a superfície e a atmosfera na caatinga.

O armazenamento de água interceptada pelas folhas foi inicializado com valor nulo. Os valores iniciais de umidade do solo foram obtidos após o modelo atingir o equilíbrio. O modelo SSiB foi integrado por um ano (julho de 2004 a junho de 2005), utilizando medidas de um perfilador como condição inicial de água no solo. Após a integração de um ano repetiu-se o procedimento por 25 vezes até alcançar equilíbrio de água no solo, obtendo-se, assim, o perfil de água nas três camadas. As frações do conteúdo de água na superfície, w_1 , na zona de raízes, w_2 , e na zona de recarga, w_3 , foram 0,43, 0,49 e 0,58 $m^3 m^{-3}$, respectivamente. A temperatura do dossel foi inicializada a partir da temperatura média diária do ar do primeiro dia de medidas, sendo igual a 296 K.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidas as variabilidades mensais dos componentes do balanço de energia observados no sítio experimental, bem como as análises dos resultados do estudo de sensibilidade, do processo de calibração e da validação dos fluxos de superfície.

4.1 Balanço de energia observado

Na região de estudo, a temperatura do ar apresenta valores mais baixos nos meses de junho a agosto, com os valores médios diários sendo da ordem de 24°C (Figura 4.1a), o que está associado com a diminuição da radiação solar incidente (K_{\downarrow}) na região (Figura 4.1b), cuja média diária foi predominantemente inferior a 300 W m⁻². De dezembro a fevereiro, meses com maior disponibilidade de energia solar na região, a temperatura média diária chega a ultrapassar 30°C, o que está associado à incidência de radiação solar média diária de aproximadamente 330 W m⁻². Em regiões semi-áridas o transporte de umidade para a atmosfera compreende a transpiração dos vegetais e a evaporação do solo imediatamente após a precipitação. Assim, o conteúdo de umidade do solo (Figura 4.1 c), que resulta do efeito da chuva, é um fator determinante para as trocas de calor, de vapor e de CO₂ entre o ecossistema e a atmosfera (Oliveira et al, 2006).

A variação sazonal do saldo de radiação no período avaliado acompanha a variação sazonal da radiação solar incidente. Menores valores podem ser observados em julho de 2004, cujas médias diárias não ultrapassam 150 W m⁻², chegando a atingir valores pouco acima de 200 W m⁻² em fevereiro.

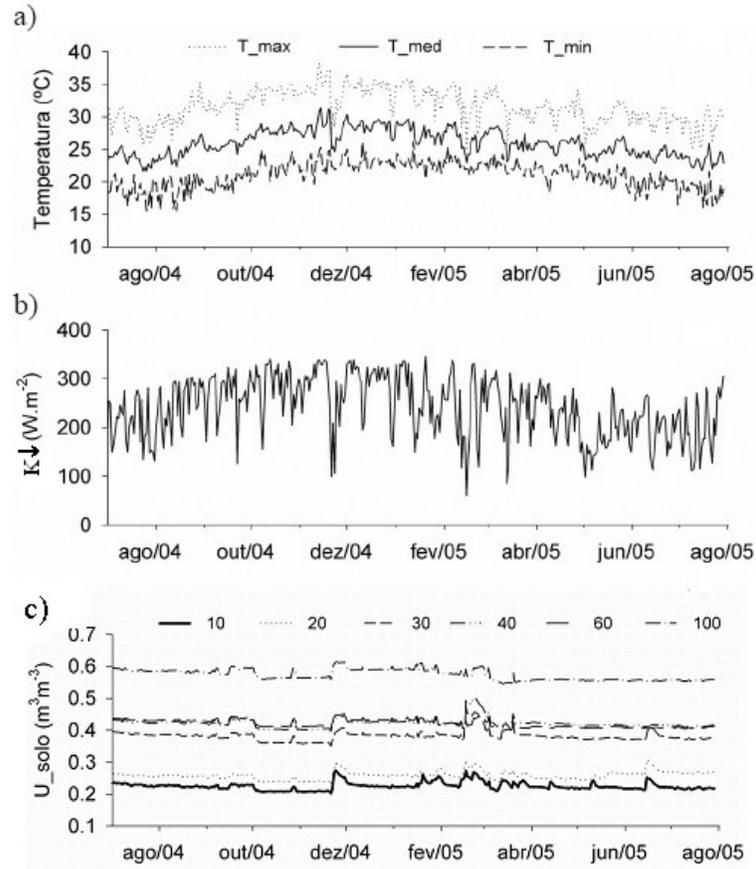


Figura 4.1 – (a) Médias diárias das temperaturas média, máxima e mínima do ar; (b) radiação solar incidente média diária (W m^{-2}); (c) máximas diárias da umidade do solo, em campo experimental na Caatinga, Embrapa Semi-Árido/Petrolina, PE, no período de 01 de julho de 2004 a 30 de julho de 2005.

Fonte: Adaptada de Oliveira et al. (2006).

O balanço de energia à superfície é um componente fundamental para todos os modelos de interação solo-superfície-atmosfera. Segundo este balanço, o saldo de radiação é particionado em energia para aquecer o ar (H), energia usada para evaporar a água (LE) e energia usada para aquecer o solo (G). A verificação do fechamento do balanço de energia indica o nível de concordância entre as medidas de R_n , LE , H e G , as quais são obtidas por diferentes métodos.

Em regiões sob condições limitadas de água (semi-áridas), durante os meses secos a maior parte da energia disponível (R_n) é liberada na forma de calor sensível. Entretanto, durante os meses úmidos este padrão é fortemente alterado após eventos de precipitação, com o fluxo de calor latente tornando-se dominante em virtude da evaporação da água retida no solo. Conforme ressaltaram Oliveira et al. (2006), que avaliaram as frações LE/R_n e H/R_n para o período de julho de 2004 a agosto de 2005 na mesma região, um aumento gradativo da fração de R_n foi utilizado para aquecer o ar, que inicialmente era cerca de 0,5 e passou a apresentar valores superiores a 0,8 à medida que se estabeleceu realmente a estação seca na região. Quanto à fração utilizada para os processos evaporativos, observou-se diminuição ao longo da estação seca, com decréscimo de LE/R_n de 0,3 para aproximadamente zero, visto que praticamente não há transpiração do extrato arbóreo/arbustivo, o qual compõe a quase totalidade da cobertura vegetal da área. Quando o solo se torna seco, menos energia vai sendo liberada na forma de evaporação e, assim, tem-se aumento de H/R_n e diminuição de LE/R_n .

No mês de julho de 2004, um mês tipicamente seco na região semi-árida do NEB, o saldo de radiação observado no sítio experimental, média mensal, foi igual a $101,2 \text{ W m}^{-2}$. Desse valor, $20,1 \text{ W m}^{-2}$, ou cerca de 20%, representou a energia liberada em forma de evaporação, enquanto $63,4 \text{ W m}^{-2}$ (63%) foi liberada na forma de calor sensível e aproximadamente 1% foi liberada em forma de calor no solo. Conforme apresentado na Tabela 4.1, a soma das componentes dos fluxos de calor observados durante o mês de julho de 2004 (fluxo de calor latente + fluxo de calor sensível + fluxo de calor no solo) é $18,7 \text{ W m}^{-2}$ menor que o saldo de radiação medido. Para o mês de março de 2005, mês representativo da estação úmida na região de estudo, o saldo de radiação observado, média mensal, foi igual a $161,2 \text{ W m}^{-2}$, enquanto a soma dos componentes dos fluxos totalizou $137,3 \text{ W m}^{-2}$, ou seja, cerca de 25% foi liberada em forma de calor latente, aproximadamente 58% foi liberada para aquecer a superfície e 2% na forma de calor no solo. Logo, a soma das componentes LE , H e G medidas durante o mês úmido foi $23,9 \text{ W m}^{-2}$ menor que o saldo de radiação medido. O fechamento do balanço de energia para a região estudada, no período de julho de 2004 a

junho de 2005 (Tabela 4.1), mostrou que as somas dos fluxos de calor latente, calor sensível e de calor no solo representou, em geral, 87% do saldo de radiação. Este resultado é equivalente aos obtidos em diversos estudos em áreas de Floresta Amazônica (Araújo et al., 2002; Rocha et al., 2004, von Randow et al, 2004) e em regiões semi-áridas (Veenendaal et al., 2004).

O não fechamento do balanço de energia em regiões áridas é atribuído, dentre outros fatores, ao intenso gradiente de temperatura nas partes superiores do solo devido à alta insolação, resultando em um considerável armazenamento de calor na camada acima do sensor (Veenendaal et al., 2004).

Tabela 4.1 – Balanço de energia dos dados observados

Mês	Nº de dias com dados	Rn (Wm⁻²)	LE (Wm⁻²)	H (Wm⁻²)	G (Wm⁻²)	LE + H + G (Wm⁻²)	% do Rn
Jul/2004	31	101,2	20,1	63,4	-1,0	82,5	82
Ago/2004	31	127,2	12,5	90,2	3,4	106,1	83
Set/2004	30	131,8	9,6	101,9	2,1	113,6	86
Out/2004	31	144,6	8,3	117,8	4,5	130,6	90
Nov/2004	30	142,2	12,5	109,6	3,6	125,7	88
Dez/2004	07	170,6	16,7	130,2	11,8	158,7	93
Jan/2005	22	130,2	13,8	103,9	-0,3	117,4	90
Fev/2005	11	150,1	30,9	94,4	6,9	132,2	88
Mar/2005	10	161,2	39,6	93,8	3,9	137,3	85
Abr/2005	13	193,5	28,1	101,1	37,1	166,3	86
Mai/2005	21	100,8	23,1	62,2	0,3	85,6	85
Jun/2005	30	99,2	22,5	63,2	-0,7	85,0	86

O comportamento diário dos fluxos de energia na superfície pode ser melhor verificado analisando-se meses típicos sobre diferentes condições de umidade do solo. Para isso, dois meses foram selecionados: o mês de julho de 2004, representando a estação seca e o mês de março de 2005, representando a estação úmida na região. As Figuras 4.2a e 4.2b apresentam os componentes do balanço de energia para os meses de julho e março, respectivamente. No mês de julho, observou-se que R_n atingiu 500 W m^{-2} , com H e LE máximos sendo, respectivamente, aproximadamente iguais a 300 W m^{-2} e 60 W m^{-2} e o

fluxo de calor no solo atingindo aproximadamente 50 W m^{-2} . Outrossim, no mês de março de 2005 (mês chuvoso), com o aumento da evapotranspiração, LE chegou a apresentar valores superiores a 100 W m^{-2} , enquanto que o fluxo de calor sensível foi de aproximadamente 350 W m^{-2} . Rn e G apresentaram valores maiores, da ordem de 650 W m^{-2} e 100 W m^{-2} , respectivamente. Observa-se que a taxa de evapotranspiração da vegetação é sempre inferior ao fluxo de calor sensível em função da pouca disponibilidade de água na região.

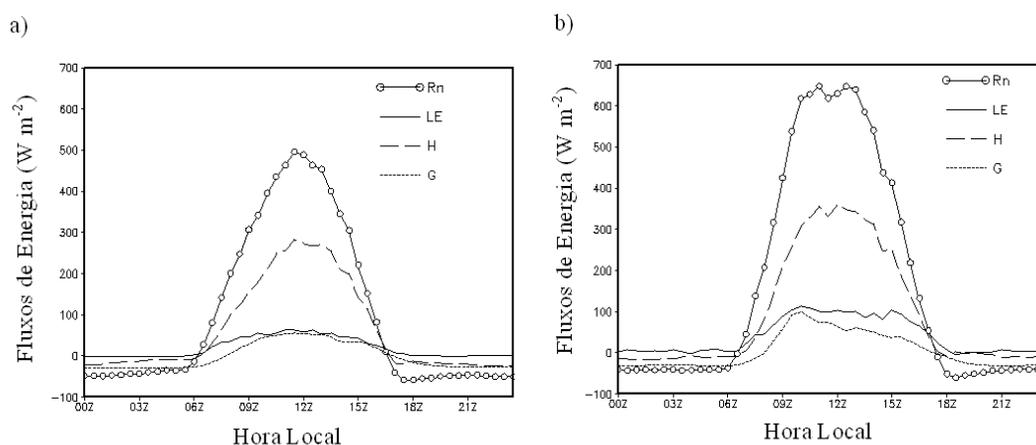


Figura 4.2 – Ciclos diários dos componentes do balanço de energia para os meses: (a) julho de 2004 e (b) março de 2005.

4.2 Avaliação do Modelo SSiB

A avaliação do esquema de superfície SSiB (“*off-line*”) foi feita utilizando medidas micrometeorológicas coletadas no sítio experimental do CPATSA (caatinga) durante um período seco (julho a setembro de 2004) e outro período úmido (janeiro a março de 2005). Ressalta-se que para os meses de janeiro a março de 2005, não se dispôs de dados para todos os dias, ou seja, consideraram-se então dados dos dias 09 a 31 de janeiro, de 01 a 11 de fevereiro e de 01 a 10 de março de 2005.

a) Período seco: julho a setembro de 2004

Os fluxos calculados de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G) versus os observados durante o período seco são apresentados na Figura 4.3.

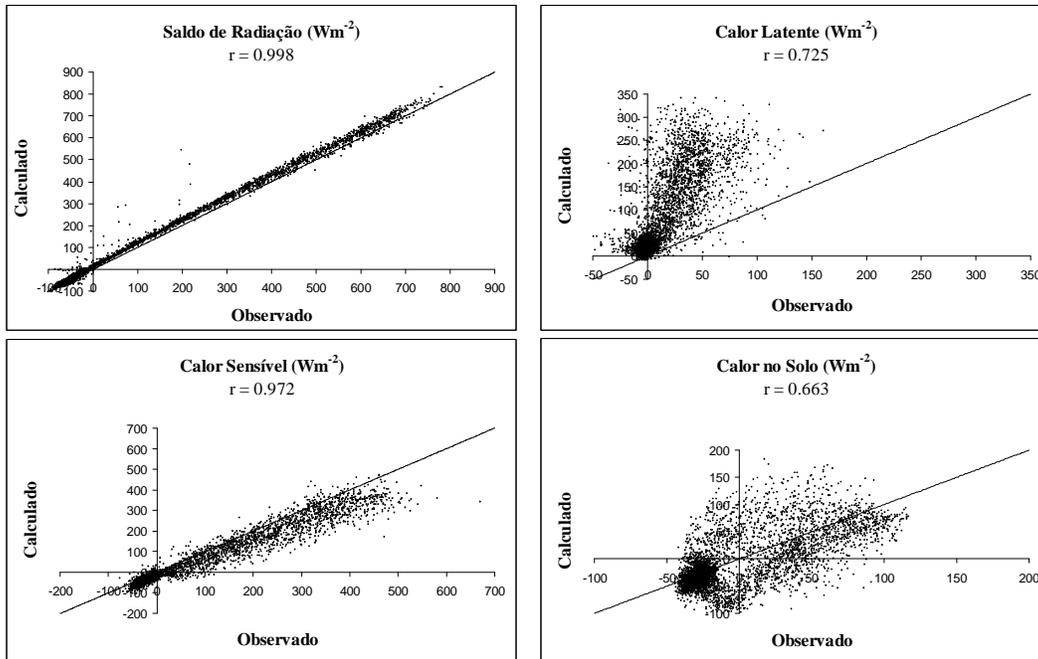


Figura 4.3 – Fluxos calculados de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE) e de calor sensível (H) versus os observados (julho a setembro de 2004).

Como pode ser visto, o modelo simulou bem o R_n para o período seco, fato esse que pode estar relacionado à forma como ele é calculado no modelo. No modelo SSiB, o R_n é função da temperatura da superfície e de dois parâmetros morfológicos, a fração de cobertura vegetal (V_c) e o índice de área foliar (L_c), conforme mostrados nas equações 3.9 e 3.10. A boa simulação pode indicar que esses parâmetros representam razoavelmente o bioma caatinga durante os meses secos, especialmente no que concerne ao saldo de radiação. Os erros médios (“bias”) e os desvios médios quadráticos (DMQ) foram pequenos, corroborando que o modelo calculou bem R_n , conforme pode ser

observado na Tabela 4.2. O erro médio e o desvio médio quadrático foram calculados utilizando-se as Equações 4.1 e 4.2, respectivamente,

$$\text{Erro Médio} = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^n (S - O) \quad (4.1)$$

$$\text{DMQ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{I=1}^n (S - O)^2} \quad (4.2)$$

em que N é o número de pontos experimentais, S o valor simulado e O o valor observado.

Na Tabela 4.2, os fluxos correspondem aos valores médios para o período de 31 dias de integração para os meses de julho e agosto de 2004 e 30 dias de integração para o mês de setembro de 2004. Os valores de LE são superestimados pelo modelo em todos os meses, com valores médios diários de $53,2 \text{ W m}^{-2}$ a $83,8 \text{ W m}^{-2}$ maiores que os observados. Isso pode estar relacionado aos parâmetros utilizados no cálculo dessa variável, indicando a necessidade de um melhor ajuste. Os parâmetros responsáveis pelo controle estomático e, conseqüentemente, pela evapotranspiração, são os coeficientes de resistência estomática para a radiação fotossinteticamente ativa (a , b e c), a fração de cobertura vegetal (V_c) e a fração de folha verde do dossel (N_c). A diferença entre os fluxos médios de calor sensível modelado e observado foi menor que aquela para o fluxo de calor latente. A maior diferença é observada para o mês de setembro de 2004, em que o valor médio diário de H calculado foi $44,5 \text{ W m}^{-2}$ maior que o observado.

Apesar de apresentar erro médio menor, o DMQ para o fluxo de calor no solo (G) foi um tanto elevado para todo o período seco ($59,6 \text{ W m}^{-2}$ no mês de setembro de 2004), como pode ser visto na Tabela 4.2, indicando haver alta dispersão entre os valores observados e os calculados.

Tabela 4.2 – Resultados estatísticos da simulação para caatinga – parâmetros não calibrados (meses secos) ($W m^{-2}$).

julho/2004							
Calculado				Observado			
<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
107,2	73,3	43,5	-9,5	101,2	20,1	63,4	-1,0
Erro Médio *				DMQ			
6,0	53,2	-19,9	-8,5	19,4	73,7	34,8	41,7
agosto/2004							
Calculado				Observado			
<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
136,0	78,5	61,8	-4,3	127,2	12,5	90,2	3,4
Erro Médio *				DMQ			
8,8	66,0	-28,4	-7,6	21,5	91,8	41,6	37,5
setembro/2004							
Calculado				Observado			
<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
146,6	93,4	57,0	-3,8	131,8	9,6	101,9	2,1
Erro Médio *				DMQ			
14,9	83,8	-45,0	-5,8	27,1	111,8	59,6	38,8

* O erro médio consiste em acumular as diferenças entre as variáveis previstas pelo modelo e os dados observados para todo o período.

A Figura 4.4 apresenta a evolução temporal dos fluxos de superfície calculados e os observados para o mês de julho de 2004. Conforme mencionado, o *Rn* foi bem estimado para todos os dias, enquanto *LE* foi superestimado durante todo o período. Por outro lado, o fluxo de calor latente modelado está próximo do observado durante o período noturno, com a maior inconsistência ocorrendo durante o dia, quando o saldo de radiação é maior. Situação oposta é observada no caso de *H*, em que o modelo subestimou os valores observados em todos os dias. As medidas dos fluxos de calor latente e de calor sensível foram realizadas utilizando o sistema de covariância de vórtices turbulentos (“eddy correlation”), com o qual o fechamento do balanço de energia não é garantido, podendo assim apresentar discrepâncias em comparação com os dados observados, já que no modelo SSiB o balanço de energia é fechado.

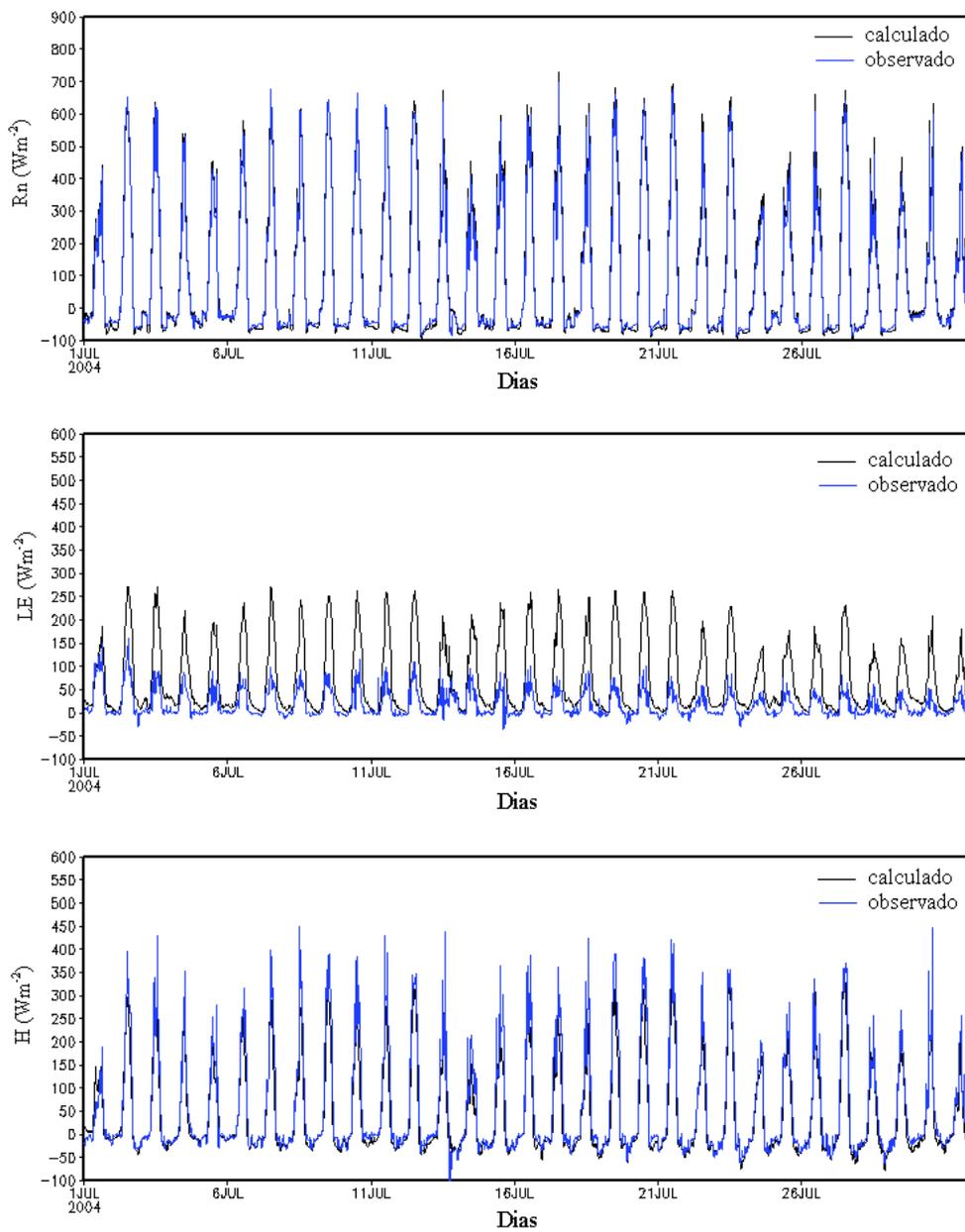


Figura 4.4 – Evolução temporal dos fluxos de saldo de radiação (Rn), de calor latente (LE) e de calor sensível (H) calculados pelo SSiB (linha sólida) e observados (pontilhados) para o mês de julho de 2004.

b) Período úmido: janeiro a março de 2005

Os fluxos calculados de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G) versus os observados durante o período úmido são apresentados na Figura 4.5.

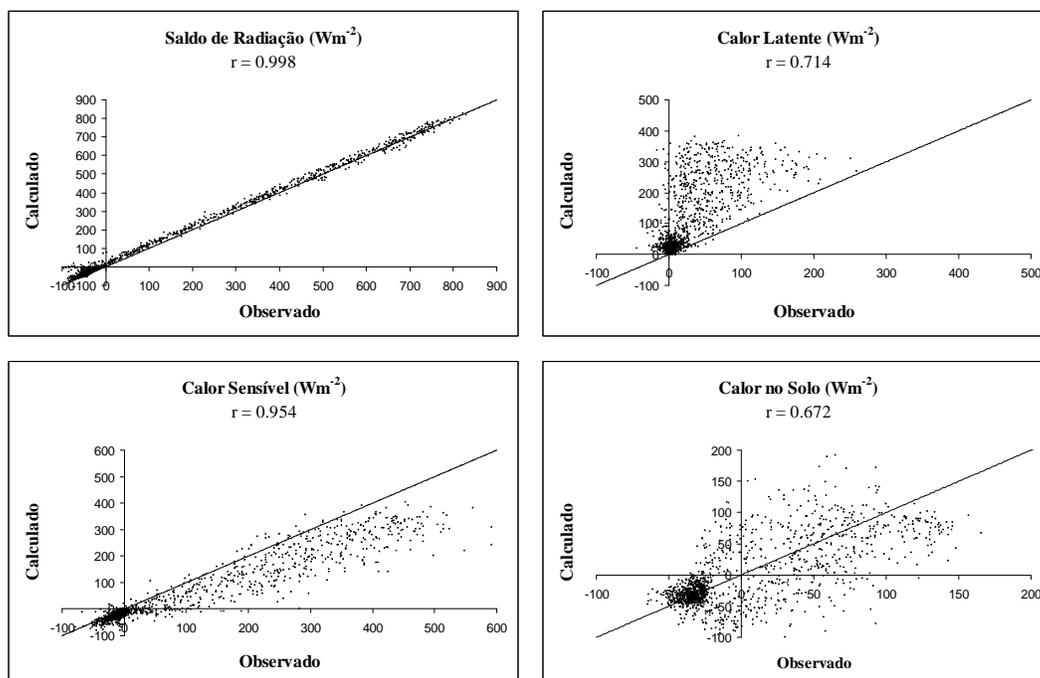


Figura 4.5 – Fluxos calculados de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE), de calor sensível (H) e calor no solo (G) versus os observados (janeiro a março de 2005).

Assim como nos meses secos, o modelo calculou bem o R_n para o período úmido, o que indica que os parâmetros utilizados no cálculo do saldo de radiação (V_c e L_c) representam adequadamente o bioma caatinga (Tabela 4.3). Concernente aos fluxos turbulentos, uma menor dispersão foi observada no fluxo de calor sensível (ver DMQ na Tabela 4.4). Na Tabela 4.4, os fluxos correspondem aos valores médios para os períodos de 22, 11 e 10 dias de integração referentes respectivamente aos meses de janeiro, fevereiro e março de 2005.

Tabela 4.3 – Parâmetros fixos e sazonais do modelo SSiB para o bioma caatinga (tipo 8)

Parâmetros fixos												
a	93989,42					Ψ_1	1,92					
b	0,01					Ψ_2	5,61					
c	855					B	4,05					
T₀	315					Ψ_s	-0,035					
h₅	0,0275					K_s	0,2x10-03					
D₁	0,02					θ_s	0,4352					
D₂	0,47											
D₃	1,00											
Parâmetros sazonais												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
L_c	0,26	0,81	1,51	1,15	0,75	0,58	0,58	0,58	0,45	0,29	0,26	0,26
N_c	0,57	0,87	0,65	0,52	0,63	0,8	0,8	0,53	0,36	0,57	0,57	0,57
V_c	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
d	2,39	2,97	3,14	3,06	2,91	2,81	2,81	2,81	2,66	2,39	2,39	2,39
Z₀	0,2	0,27	0,29	0,28	0,26	0,24	0,24	0,24	0,23	0,2	0,2	0,2

Fonte: Dorman e Sellers (1989)

O fluxo de calor latente LE é superestimado pelo modelo em todos os dias de simulação, com valores médios de $61,6 \text{ W m}^{-2}$ a $90,4 \text{ W m}^{-2}$ acima dos observados. Esse resultado pode também estar relacionado aos parâmetros utilizados no cálculo dessa variável (coeficientes de resistência estomática para a radiação fotossinteticamente ativa (a , b e c), V_c e N_c), necessitando de ajustes. Já H é subestimado em todo o período, conforme mostrado na Figura 4.6 e na Tabela 4.4. Em média, H calculado foi da ordem de 40 W m^{-2} menor que o observado. Apesar dos valores dos erros médios calculados para o fluxo de calor no solo (G) serem menores, o DMQ foi um tanto elevado ($45,1 \text{ W m}^{-2}$ no mês de janeiro de 2005), indicando haver alta dispersão entre os valores observados e os calculados.

Relacionando os resultados das simulações do modelo SSiB para os meses secos e úmidos, observa-se que os valores dos erros médios e os DMQs dos fluxos de energia para os meses secos são menores que aqueles calculados para os meses úmidos, ainda que os fluxos de calor sensível e de calor latente tenham sido melhor calculados pelo

modelo SSiB. De modo geral, o modelo reproduziu razoavelmente as variações diurna e sazonal dos fluxos de energia, mas com consideráveis discrepâncias nos erros médios, nos DMQs e nos máximos e mínimos dos ciclos diurnos, principalmente do fluxo de calor latente. Além disso, o modelo SSiB não simulou satisfatoriamente o fluxo de calor no solo, o que pode ser constatado a partir dos baixos coeficientes de correlação calculados, os quais foram iguais a 0,66 para os meses de julho a setembro de 2004 e 0,67 para os meses de janeiro a março de 2005 (Figuras 4.3 e 4.5).

Tabela 4.4 – Resultados estatísticos da simulação para caatinga – parâmetros não calibrados (meses úmidos) (Wm^{-2})

janeiro/2005							
Calculado				Observado			
<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
148,77	104,19	48,62	-4,05	130,23	13,75	103,90	-0,25
Erro Médio*				DMQ			
18,54	90,44	-55,28	-3,79	25,36	133,73	90,91	45,09
fevereiro/2005							
Calculado				Observado			
<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
159,93	107,28	54,78	-2,12	150,05	30,91	94,43	6,88
Erro Médio*				DMQ			
9,86	76,22	-39,58	-8,99	15,44	110,93	58,65	40,67
março/2005							
Calculado				Observado			
<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>Rn</i>	<i>LE</i>	<i>H</i>	<i>G</i>
166,75	101,21	66,88	-1,33	161,17	39,61	93,77	3,89
Erro Médio*				DMQ			
5,57	61,47	-26,83	-5,21	15,23	94,64	44,74	40,27

* O erro médio consiste em acumular as diferenças entre as variáveis previstas pelo modelo e os dados observados para todo o período.

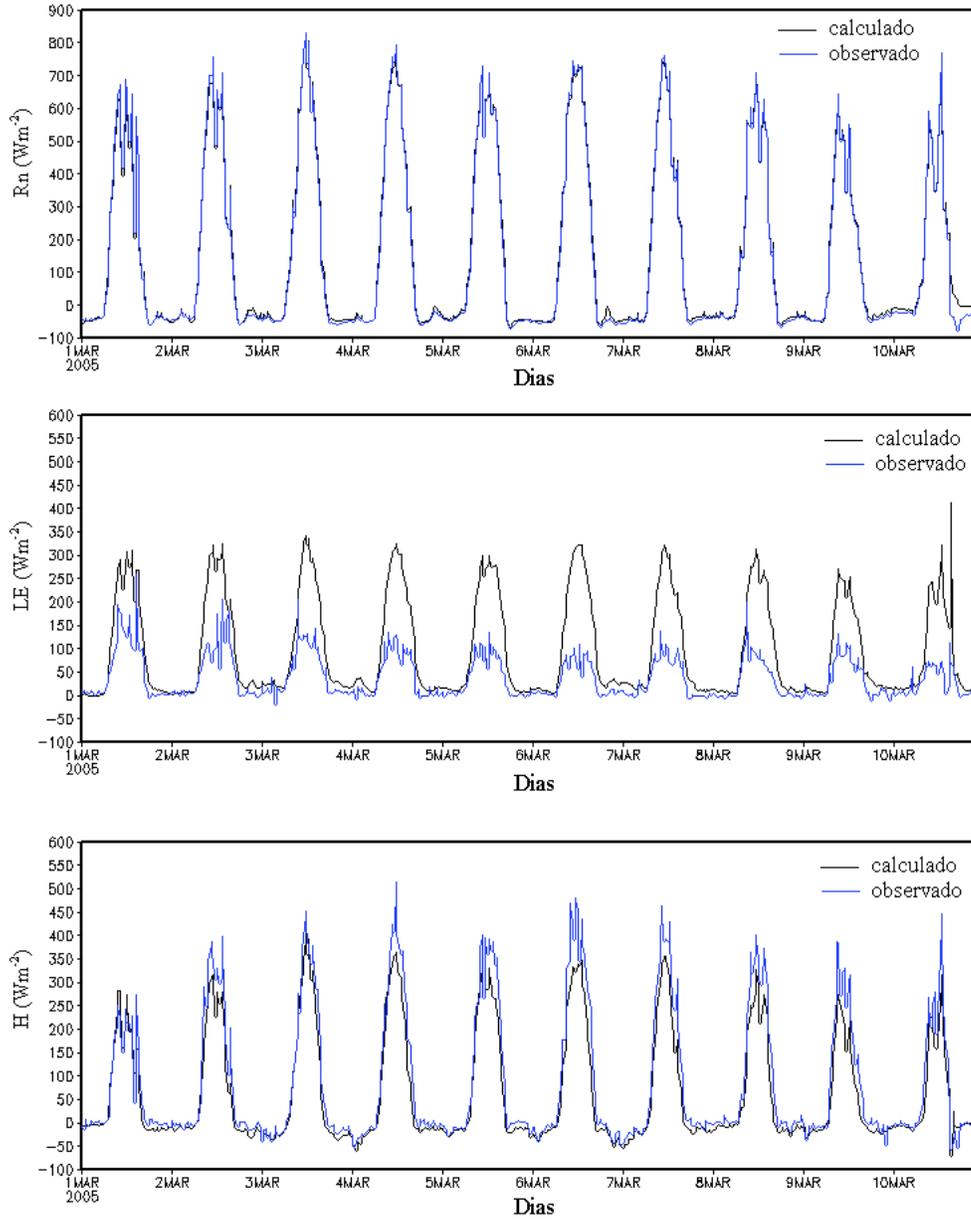


Figura 4.6 – Evolução temporal dos fluxos de saldo de radiação (R_n), de calor latente (LE) e de calor sensível (H) calculados pelo SSiB (linha sólida) e observados (pontilhados) para o mês de março de 2005

4.3 Estudo de sensibilidade dos parâmetros do esquema de superfície SSiB

Antes de iniciar o processo de calibração propriamente dito realizou-se um estudo de sensibilidade do esquema SSiB, a fim de determinar o conjunto de parâmetros que apresenta maior sensibilidade em relação aos processos de troca entre a superfície e a atmosfera. Os testes de sensibilidade foram realizados utilizando a versão *off-line* do modelo SSiB, o que significa que este tipo de estudo não incorpora os “feedbacks” que possam ocorrer em consequência dos fluxos de superfície alterados.

O estudo de sensibilidade foi realizado considerando dados do período de 01 de julho de 2004 a 30 de junho de 2005, utilizando medidas meteorológicas e de fluxos de superfície obtidos no sítio experimental. Os parâmetros sazonais considerados para os testes de sensibilidade foram: Índice de área foliar (L_c), fração de folhas verdes (N_c), fração de cobertura vegetal (V_c), deslocamento do plano zero (d) e comprimento de rugosidade (Z_0). Os parâmetros fixos avaliados foram: a (coeficientes de resistência estomática da folha a radiação PAR), b (coeficientes de resistência estomática da folha a radiação PAR), c (coeficientes de resistência estomática da folha a radiação PAR), temperatura ótima de funcionamento dos estômatos (T_o), parâmetro de déficit de pressão de vapor d'água (h_5), potencial de água no solo ψ_1 , potencial de água no solo (ψ_2), parâmetro que relacionada a umidade volumétrica do solo e o potencial de umidade do solo (parâmetro B), potencial de água no solo à saturação (ψ_s), condutividade hidráulica à saturação (K_s) e porosidade do solo (θ_s). Cada um desses parâmetros selecionados foi modificado em cada integração considerada, enquanto os demais foram mantidos constantes. O mesmo procedimento foi repetido para outro parâmetro e assim sucessivamente. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros fixos e sazonais iniciais da classe tipo 8 (caatinga) do esquema de superfície SSiB, considerados no estudo de sensibilidade.

Os testes de sensibilidade foram realizados para cada mês de dados disponíveis; no entanto, para a discussão dos resultados considerou-se dois períodos distintos, isto é, um trimestre seco e outro úmido. Os meses de julho a setembro de 2004 são representativos

do período seco, enquanto os meses de janeiro a março de 2005 são representativos do período úmido da região de estudo (Petrolina-PE). A seleção desses dois conjuntos de meses foi realizada com base nos valores de precipitação pluviométrica acumulada mensal (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Total mensal da precipitação pluviométrica no campo experimental de caatinga, Embrapa Semi-Árido/Petrolina, no período de julho de 2004 a junho de 2005.

2004	(mm)	2005	(mm)
julho	0,8	janeiro	48,5
agosto	0,5	fevereiro	78,0
setembro	0,8	março	89,9
outubro	1,5	abril	24,4
novembro	20,3	maio	2,0
dezembro	0,5	junho	31,5

As Tabelas 4.6 a 4.8 apresentam os resultados dos testes de sensibilidade das variações dos parâmetros sazonais e fixos nos fluxos de energia para cada mês do trimestre seco, enquanto aqueles para cada mês da estação chuvosa são apresentados nas tabelas 4.9 a 4.11. Os resultados dos testes de sensibilidade efetuados para os demais meses intermediários são apresentados no Apêndice A.

Nas tabelas são apresentados os valores médios mensais do saldo de radiação ($R_n - W/m^2$), do fluxo de calor latente ($LE - W/m^2$), do fluxo de calor sensível ($H - W/m^2$) e do fluxo de calor no solo ($G - W/m^2$) simulados pelo esquema SSiB para cada variação dos parâmetros sazonais e fixos. Em cada tabela, a primeira linha com valores refere-se aos valores médio mensais dos fluxos de superfície simulados considerando-se os valores padrões dos parâmetros sazonais e fixos. Os termos com % referem-se às porcentagens de mudanças ocorridas com as variações efetuadas em cada parâmetro. Com exceção do parâmetro fração de folhas verdes (N_c), as variações consideradas nesse estudo foram reduções de 50% e aumentos de 100% nos valores iniciais dos parâmetros fixos e sazonais.

Tabela 4.6 – Testes de sensibilidade para o mês de julho de 2004

Julho de 2004								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	109,12		-7,85		71,65		45,32	
Lc*0.5	109,10	-0,02	-7,79	0,76	71,32	-0,46	45,57	0,55
Lc*2.0	109,16	0,04	-7,87	-0,25	71,92	0,38	45,11	-0,46
Nc*0.01	107,36	-1,61	-7,85	0,00	68,76	-4,03	46,45	2,49
Nc*1.15	109,22	0,09	-7,85	0,00	72,02	0,52	45,05	-0,60
Vc*0.5	109,04	-0,07	-7,68	2,17	71,37	-0,39	45,35	0,07
Vc*2.0	109,49	0,34	-8,13	-3,57	72,89	1,73	44,73	-1,30
d*0.5	109,48	0,33	-7,93	-1,02	71,15	-0,70	46,27	2,10
d*2.0	108,36	-0,70	-7,64	2,68	72,52	1,21	43,47	-4,08
Z ₀ *0.5	108,41	-0,65	-7,72	1,66	72,14	0,68	43,98	-2,96
Z ₀ *2.0	109,26	0,13	-7,87	-0,25	71,57	-0,11	45,57	0,55
a*0.5	109,21	0,08	-7,87	-0,25	72,40	1,05	44,68	-1,41
a*2.0	109,03	-0,08	-7,83	0,25	70,95	-0,98	45,91	1,30
b*0.5	109,11	-0,01	-7,85	0,00	71,62	-0,04	45,34	0,04
b*2.0	109,13	0,01	-7,85	0,00	71,70	0,07	45,28	-0,09
c*0.5	109,25	0,12	-7,88	-0,38	72,62	1,35	44,51	-1,79
c*2.0	109,01	-0,10	-7,82	0,38	70,83	-1,14	46,01	1,52
To*0.5	108,81	-0,28	-7,77	1,02	69,34	-3,22	47,25	4,26
To*2.0	109,17	0,05	-7,86	-0,13	72,13	0,67	44,90	-0,93
h5*0.5	109,19	0,06	-7,86	-0,13	72,18	0,74	44,87	-0,99
h5*2.0	109,04	-0,07	-7,83	0,25	71,01	-0,89	45,86	1,19
ψ ₁ *0.5	109,12	0,00	-7,85	0,00	71,65	0,00	45,32	0,00
ψ ₁ *2.0	109,12	0,00	-7,85	0,00	71,65	0,00	45,32	0,00
ψ ₂ *0.5	109,12	0,00	-7,85	0,00	71,65	0,00	45,32	0,00
ψ ₂ *2.0	109,12	0,00	-7,85	0,00	71,65	0,00	45,32	0,00
B*0.5	105,57	-3,25	-6,23	20,64	48,91	-31,74	62,89	38,77
B*2.0	103,85	-4,83	-6,44	17,96	47,49	-33,72	62,80	38,57
ψs*0.5	108,11	-0,93	-7,21	8,15	65,12	-9,11	50,20	10,77
ψs*2.0	110,27	1,05	-8,87	-12,99	79,07	10,36	40,07	-11,58
Ks*0.5	108,44	-0,62	-7,30	7,01	67,09	-6,36	48,64	7,33
Ks*2.0	109,30	0,16	-8,21	-4,59	72,95	1,81	44,56	-1,68
θs*0.5	108,46	-0,60	-6,99	10,96	65,03	-9,24	50,42	11,25
θs*2.0	108,58	-0,49	-9,56	-21,78	75,13	4,86	43,01	-5,10

Tabela 4.7 – Testes de sensibilidade para o mês de agosto de 2004

Agosto de 2004								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	135,70		3,73		61,28		70,65	
Lc*0,5	135,67	-0,02	3,70	-0,80	60,39	-1,45	71,50	1,20
Lc*2,0	135,70	0,00	3,72	-0,27	61,83	0,90	70,14	-0,72
Nc*0,01	133,89	-1,33	3,75	0,54	58,36	-4,77	71,78	1,60
Nc*1,15	135,83	0,10	3,73	0,00	61,71	0,70	70,40	-0,35
Vc*0,5	135,36	-0,25	3,86	3,49	59,55	-2,82	71,96	1,85
Vc*2,0	136,62	0,68	3,54	-5,09	64,63	5,47	68,46	-3,10
d*0,5	136,37	0,49	3,61	-3,22	61,11	-0,28	71,64	1,40
d*2,0	134,40	-0,96	3,82	2,41	61,63	0,57	68,95	-2,41
Z ₀ *0,5	134,52	-0,87	3,91	4,83	61,60	0,52	69,01	-2,32
Z ₀ *2,0	135,87	0,13	3,69	-1,07	61,06	-0,36	71,62	1,37
a*0,5	135,77	0,05	3,72	-0,27	62,13	1,39	69,92	-1,03
a*2,0	135,55	-0,11	3,74	0,27	60,47	-1,32	71,34	0,98
b*0,5	135,65	-0,04	3,73	0,00	61,26	-0,03	70,67	0,03
b*2,0	135,67	-0,02	3,73	0,00	61,34	0,10	70,60	-0,07
c*0,5	135,85	0,11	3,71	-0,54	62,66	2,25	69,49	-1,64
c*2,0	135,51	-0,14	3,74	0,27	60,19	-1,78	71,57	1,30
To*0,5	135,25	-0,33	3,77	1,07	58,43	-4,65	73,06	3,41
To*2,0	135,71	0,01	3,73	0,00	61,66	0,62	70,31	-0,48
h5*0,5	135,77	0,05	3,71	-0,54	62,11	1,35	69,95	-0,99
h5*2,0	135,54	-0,12	3,74	0,27	60,39	-1,45	71,41	1,08
ψ ₁ *0,5	135,66	-0,03	3,73	0,00	61,29	0,02	70,65	0,00
ψ ₁ *2,0	135,66	-0,03	3,73	0,00	62,29	1,65	70,65	0,00
ψ ₂ *0,5	135,66	-0,03	3,73	0,00	61,29	0,02	70,65	0,00
ψ ₂ *2,0	135,66	-0,03	3,73	0,00	61,29	0,02	70,65	0,00
B*0,5	133,88	-1,34	2,83	-24,13	48,69	-20,55	82,36	16,57
B*2,0	128,23	-5,50	3,93	5,36	29,52	-51,83	94,78	34,15
ψs*0,5	134,83	-0,64	3,65	-2,14	56,53	-7,75	74,65	5,66
ψs*2,0	139,68	2,93	3,04	-18,50	83,63	36,47	53,02	-24,95
Ks*0,5	132,73	-2,19	3,93	5,36	45,12	-26,37	83,68	18,44
Ks*2,0	138,05	1,73	3,26	-12,60	74,50	21,57	60,30	-14,65
θs*0,5	134,47	-0,91	3,42	-8,31	53,22	-13,15	77,83	10,16
θs*2,0	137,88	1,61	3,73	0,00	75,49	23,19	58,66	-16,97

Tabela 4.8 – Testes de sensibilidade para o mês de setembro de 2004

Setembro de 2004								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	137,74		1,97		31,95		103,82	
Lc*0,5	137,88	0,10	1,98	0,51	30,86	-3,41	105,04	1,17
Lc*2,0	137,70	-0,03	1,95	-1,02	32,77	2,57	102,98	-0,81
Nc*0,01	136,44	-0,94	1,96	-0,51	29,76	-6,85	104,72	0,87
Nc*1,15	137,90	0,12	1,97	0,00	32,32	1,16	103,61	-0,20
Vc*0,5	137,41	-0,24	1,94	-1,52	30,06	-5,92	105,41	1,53
Vc*2,0	138,97	0,89	2,06	4,57	34,68	8,54	102,33	-1,44
d*0,5	138,87	0,82	1,93	-2,03	32,03	0,25	104,91	1,05
d*2,0	136,32	-1,03	2,01	2,03	31,84	-0,34	102,47	-1,30
Z ₀ *0,5	135,81	-1,40	2,05	4,06	31,90	-0,16	101,86	-1,89
Z ₀ *2,0	138,17	0,31	1,95	-1,02	31,95	0,00	105,28	1,41
a*0,5	137,82	0,06	1,98	0,51	32,59	2,00	103,26	-0,54
a*2,0	137,66	-0,06	1,96	-0,51	31,32	-1,97	104,37	0,53
b*0,5	137,73	-0,01	1,97	0,00	31,94	-0,03	103,82	0,00
b*2,0	137,75	0,01	1,97	0,00	32,00	0,16	103,78	-0,04
c*0,5	137,92	0,13	1,98	0,51	33,26	4,10	102,69	-1,09
c*2,0	137,60	-0,10	1,96	-0,51	30,97	-3,07	104,67	0,82
To*0,5	137,40	-0,25	1,94	-1,52	29,64	-7,23	105,83	1,94
To*2,0	137,77	0,02	1,97	0,00	32,21	0,81	103,59	-0,22
h ₅ *0,5	137,85	0,08	1,98	0,51	32,75	2,50	103,12	-0,67
h ₅ *2,0	137,63	-0,08	1,96	-0,51	31,15	-2,50	104,52	0,67
ψ ₁ *0,5	137,74	0,00	1,97	0,00	31,96	0,03	103,81	-0,01
ψ ₁ *2,0	137,74	0,00	1,97	0,00	31,96	0,03	103,81	-0,01
ψ ₂ *0,5	137,74	0,00	1,97	0,00	31,96	0,03	103,81	-0,01
ψ ₂ *2,0	137,74	0,00	1,97	0,00	31,96	0,03	103,81	-0,01
B*0,5	140,85	2,26	1,27	-35,53	34,44	7,79	105,14	1,27
B*2,0	133,26	-3,25	1,53	-22,34	17,50	-45,23	114,22	10,02
ψ _s *0,5	137,35	-0,28	1,86	-5,58	29,35	-8,14	106,14	2,23
ψ _s *2,0	141,29	2,58	2,50	26,90	50,45	57,90	88,34	-14,91
K _s *0,5	136,20	-1,12	1,68	-14,72	24,28	-24,01	110,13	6,08
K _s *2,0	140,64	2,11	1,85	-6,09	47,16	47,61	91,64	-11,73
θ _s *0,5	137,00	-0,54	1,49	-24,37	26,06	-18,44	109,46	5,43
θ _s *2,0	142,45	3,42	2,26	14,72	57,76	80,78	82,42	-20,61

Tabela 4.9 – Testes de sensibilidade para o mês de janeiro de 2005

Janeiro de 2005								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	151,06		-1,43		75,30		77,20	
Lc*0,5	151,02	-0,03	-1,47	-2,80	74,51	-1,05	77,98	1,01
Lc*2,0	151,12	0,04	-1,41	1,40	76,47	1,55	76,06	-1,48
Nc*0,01	149,84	-0,81	-1,44	-0,70	73,00	-3,05	78,28	1,40
Nc*1,15	151,18	0,08	-1,43	0,00	75,67	0,49	76,95	-0,32
Vc*0,5	150,76	-0,20	-1,51	-5,59	74,88	-0,56	77,39	0,25
Vc*2,0	151,76	0,46	-1,32	7,69	76,15	1,13	76,94	-0,34
d*0,5	152,17	0,73	-1,36	4,90	74,70	-0,80	78,84	2,12
d*2,0	150,44	-0,41	-1,47	-2,80	75,62	0,42	76,29	-1,18
Z ₀ *0,5	149,29	-1,17	-1,51	-5,59	75,40	0,13	75,41	-2,32
Z ₀ *2,0	151,51	0,30	-1,38	3,50	75,04	-0,35	78,99	2,32
a*0,5	151,12	0,04	-1,43	0,00	75,75	0,60	76,80	-0,52
a*2,0	151,00	-0,04	-1,44	-0,70	74,80	-0,66	77,64	0,57
b*0,5	151,06	0,00	-1,43	0,00	75,29	-0,01	77,20	0,00
b*2,0	151,07	0,01	-1,43	0,00	75,32	0,03	77,19	-0,01
c*0,5	151,26	0,13	-1,41	1,40	76,54	1,65	76,13	-1,39
c*2,0	150,93	-0,09	-1,45	-1,40	74,39	-1,21	77,98	1,01
To*0,5	150,76	-0,20	-1,47	-2,80	73,29	-2,67	78,94	2,25
To*2,0	151,09	0,02	-1,43	0,00	75,49	0,25	77,04	-0,21
h ₅ *0,5	151,17	0,07	-1,42	0,70	76,01	0,94	76,58	-0,80
h ₅ *2,0	150,96	-0,07	-1,45	-1,40	74,58	-0,96	77,83	0,82
ψ ₁ *0,5	151,06	0,00	-1,43	0,00	75,30	0,00	77,20	0,00
ψ ₁ *2,0	151,06	0,00	-1,43	0,00	75,30	0,00	77,20	0,00
ψ ₂ *0,5	151,06	0,00	-1,43	0,00	75,30	0,00	77,20	0,00
ψ ₂ *2,0	151,06	0,00	-1,43	0,00	75,30	0,00	77,20	0,00
B*0,5	150,31	-0,50	-0,68	52,45	63,60	-15,54	87,40	13,21
B*2,0	149,65	-0,93	-3,95	-176,22	76,10	1,06	77,50	0,39
ψ _s *0,5	150,14	-0,61	-1,51	-5,59	70,75	-6,04	80,89	4,78
ψ _s *2,0	153,00	1,28	-1,13	20,98	84,36	12,03	69,78	-9,61
K _s *0,5	147,59	-2,30	-2,98	-108,39	61,31	-18,58	89,26	15,62
K _s *2,0	152,72	1,10	-1,54	-7,69	83,20	10,49	71,06	-7,95
θ _s *0,5	149,63	-0,95	-2,10	-46,85	66,74	-11,37	84,99	10,09
θ _s *2,0	151,79	0,48	-2,18	-52,45	83,75	11,22	70,22	-9,04

Tabela 4.10 – Testes de sensibilidade para o mês de fevereiro de 2005

Fevereiro de 2005								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	146,71		-1,63		94,96		53,39	
Lc*0,5	146,59	-0,08	-1,70	-4,29	94,23	-0,77	54,06	1,25
Lc*2,0	146,85	0,10	-1,57	3,68	95,91	1,00	52,51	-1,65
Nc*0,01	144,36	-1,60	-1,62	0,61	90,82	-4,36	55,16	3,32
Nc*1,15	146,82	0,07	-1,64	-0,61	95,46	0,53	53,00	-0,73
Vc*0,5	146,43	-0,19	-1,58	3,07	94,96	0,00	53,05	-0,64
Vc*2,0	147,41	0,48	-1,67	-2,45	96,23	1,34	53,05	-0,64
d*0,5	147,35	0,44	-1,59	2,45	93,68	-1,35	55,27	3,52
d*2,0	148,84	1,45	-1,58	3,07	96,29	1,40	51,13	-4,23
Z ₀ *0,5	145,54	-0,80	-1,69	-3,68	95,83	1,23	51,41	-5,62
Z ₀ *2,0	146,98	0,18	-1,62	0,61	94,77	-0,20	54,64	0,31
a*0,5	146,84	0,09	-1,65	-1,23	96,00	1,10	53,50	0,21
a*2,0	146,59	-0,08	-1,62	0,61	94,02	-0,99	54,20	1,52
b*0,5	146,70	-0,01	-1,63	0,00	94,89	-0,07	53,45	0,11
b*2,0	146,74	0,02	-1,64	-0,61	95,06	0,11	53,31	-0,15
c*0,5	146,90	0,13	-1,64	-0,61	96,24	1,35	52,30	-2,04
c*2,0	146,56	-0,10	-1,63	0,00	93,88	-1,14	54,31	1,72
To*0,5	146,27	-0,30	-1,60	1,84	91,82	-3,31	56,05	4,98
To*2,0	146,74	0,02	-1,64	-0,61	95,24	0,29	53,14	-0,47
h5*0,5	146,82	0,07	-1,64	-0,61	95,78	0,86	52,68	-1,33
h5*2,0	146,59	-0,08	-1,63	0,00	84,03	-1,51	54,19	1,50
ψ ₁ *0,5	146,71	0,00	-1,63	0,00	94,95	-0,01	53,40	0,02
ψ ₁ *2,0	146,71	0,00	-1,63	0,00	94,95	-0,01	53,40	0,02
ψ ₂ *0,5	146,71	0,00	-1,63	0,00	94,95	-0,01	53,40	0,02
ψ ₂ *2,0	146,71	0,00	-1,63	0,00	94,95	-0,01	53,40	0,02
B*0,5	141,90	-3,28	-1,06	34,97	68,33	-28,04	74,63	39,78
B*2,0	151,54	3,29	-2,85	-74,85	121,14	27,57	33,25	-37,72
ψs*0,5	145,33	-0,94	-1,27	22,09	87,52	-7,83	59,08	10,66
ψs*2,0	148,36	1,12	-1,77	-8,59	103,28	8,76	46,85	-12,25
Ks*0,5	146,62	-0,06	-1,98	-21,47	95,29	0,35	53,31	-0,15
Ks*2,0	146,75	0,03	-1,51	7,36	94,71	-0,26	53,55	0,30
θs*0,5	145,51	-0,82	-1,52	6,75	86,17	-9,26	60,86	13,99
θs*2,0	146,84	0,09	-2,06	-26,38	100,47	5,80	48,43	-9,29

Tabela 4.11 – Testes de sensibilidade para o mês de março de 2005

Março de 2005								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	153,36		-0,48		92,65		61,19	
Lc*0,5	153,21	-0,10	-0,44	-8,33	91,32	-1,44	62,30	1,81
Lc*2,0	153,68	0,31	-0,53	-10,42	95,79	3,39	58,44	-4,49
Nc*0,01	151,11	-1,47	-0,49	-2,08	89,14	-3,79	62,46	0,03
Nc*1,15	153,53	0,11	-0,47	2,08	93,09	0,47	60,92	-2,43
Vc*0,5	153,04	-0,21	-0,47	2,08	93,22	0,62	60,29	-3,44
Vc*2,0	154,29	0,61	-0,55	-14,58	92,90	0,27	61,95	-0,78
d*0,5	154,09	0,48	-0,50	-4,17	91,00	-1,78	63,58	1,83
d*2,0	152,34	-0,67	-0,40	16,67	94,03	1,49	58,72	-5,96
Z ₀ *0,5	151,95	-0,92	-0,44	8,33	93,90	1,35	58,50	-6,31
Z ₀ *2,0	153,69	0,22	-0,49	-2,08	92,06	-0,64	62,92	0,77
a*0,5	153,50	0,09	-0,48	0,00	93,59	1,01	60,38	-3,30
a*2,0	153,24	-0,08	-0,48	0,00	91,85	-0,86	61,88	-0,90
b*0,5	153,33	-0,02	-0,48	0,00	92,54	-0,12	61,28	-1,86
b*2,0	153,40	0,03	-0,48	0,00	92,86	0,23	61,03	-2,26
c*0,5	153,51	0,10	-0,47	2,08	93,65	1,08	60,33	-3,38
c*2,0	153,23	-0,08	-0,49	-2,08	91,81	-0,91	61,91	-0,85
To*0,5	152,97	-0,25	-0,50	-4,17	90,08	-2,77	63,38	1,51
To*2,0	153,38	0,01	-0,48	0,00	92,88	0,25	60,98	-2,34
h ₅ *0,5	153,45	0,06	-0,47	2,08	93,28	0,68	60,64	-2,88
h ₅ *2,0	153,25	-0,07	-0,49	-2,08	91,92	-0,79	61,82	-0,99
ψ ₁ *0,5	153,36	0,00	-0,48	0,00	92,65	0,00	61,19	-2,00
ψ ₁ *2,0	153,36	0,00	-0,48	0,00	92,65	0,00	61,19	-2,00
ψ ₂ *0,5	153,36	0,00	-0,48	0,00	92,65	0,00	61,19	-2,00
ψ ₂ *2,0	153,36	0,00	-0,48	0,00	92,65	0,00	61,19	-2,00
B*0,5	148,93	-2,89	-0,42	12,50	68,00	-26,61	81,35	30,29
B*2,0	157,86	2,93	-0,62	-29,17	116,46	25,70	42,02	-32,70
ψ _s *0,5	152,01	-0,88	-0,27	43,75	85,18	-8,06	67,10	7,46
ψ _s *2,0	154,78	0,93	-0,63	-31,25	100,18	8,13	55,23	-11,55
K _s *0,5	153,44	0,05	-0,40	16,67	93,15	0,54	60,69	-2,80
K _s *2,0	153,27	-0,06	-0,56	-16,67	92,13	-0,56	61,71	-1,17
θ _s *0,5	151,93	-0,93	-0,59	-22,92	83,34	-10,05	69,18	10,79
θ _s *2,0	153,51	0,10	-0,60	-25,00	98,35	6,15	55,77	-10,68

De modo geral, os resultados indicam que as mudanças induzidas nos parâmetros sazonais não resultaram em variações consideráveis no saldo de radiação (R_n) em todo o período estudado.

Kahan et al. (2006) ressaltaram que para o clima semi-árido, um índice de área foliar (L_c) maior significa que o dossel fornece mais área foliar para a qual a transpiração pode ocorrer. Também, mais energia incidente pode ser absorvida, a qual pode ser usada para a evaporação. Com as variações consideradas no presente estudo (aumento de 100% e redução de 50%) nos valores iniciais do índice de área foliar (L_c), os fluxos de energia foram minimamente afetados. Quando L_c é aumentado de 100% de seu valor inicial nos meses de julho a setembro de 2004, os fluxos de calor latente, calor sensível e calor no solo apresentam variações pouco significativas (variação média inferior a 2%). Já no mês de março de 2005, duplicando o valor inicial de L_c (de 1,51 para 3,02), o fluxo de calor latente aumentou da ordem de 2,5%, o fluxo de calor sensível teve uma redução de aproximadamente 6% e o fluxo de calor no solo uma redução em torno de 10%. As variações pouco expressivas dos fluxos turbulentos após alterações nos valores iniciais de L_c , nos meses secos, podem estar associadas ao baixo conteúdo de água no solo, limitando o potencial evaporativo, enquanto nos meses úmidos as pequenas variações podem estar associadas aos baixos valores de L_c se comparados com os valores deste parâmetro para outros tipos de vegetação. Embora as variações induzidas no índice de área foliar tenham resultado em mínimas alterações nos fluxos turbulentos, pode-se observar nas Tabelas 4.6 a 4.11 que o aumento de L_c ocasionou também um aumento no fluxo de calor latente, portanto os maiores valores de L_c estão associados com a menor resistência do dossel e conseqüentemente com maior evaporação.

A relação entre o parâmetro L_c e os fluxos turbulentos (fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível) pode ser melhor entendida analisando-se dias típicos com diferentes condições de umidade no solo. Para esse propósito, quatro dias foram selecionados, ou seja, dois representando a estação seca (6 e 7 de julho de 2004) e outros dois referentes à estação chuvosa na região (12 e 13 de março de 2005). Para a avaliação, considerou-se uma maior variação do parâmetro L_c , isto é, entre 0 e 5, cujos impactos na estimativa de

LE e H podem ser observados na Figura 4.7. Observa-se, com o aumento de L_c , um maior impacto na partição de energia nos dias mais úmidos, com as maiores variações ocorrendo para L_c variando de 0 a 2, o que implicou em aumento do fluxo de calor latente da ordem de 7 W m^{-2} e redução do fluxo de calor sensível de cerca de 6 W m^{-2} . Para os dias secos, a variação do parâmetro L_c teve pouco impacto nos fluxos turbulentos.

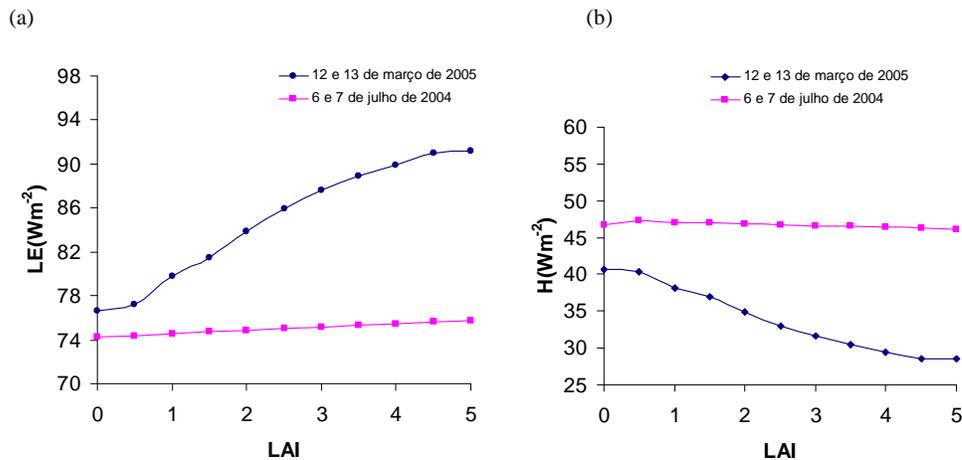


Figura 4.7 – Média diária (a) do fluxo de calor latente (LE) e (b) do fluxo de calor sensível (H) para dias secos (6 e 7 de julho de 2004) e dias úmidos (12 e 13 de março de 2005) variando-se o índice de área foliar (LAI).

A resistência estomática no dossel da vegetação afeta a quantidade de vapor d'água, de dióxido de carbono e os gases traços que podem ser trocados entre as folhas e atmosfera, conforme também destacaram Hanan e Prince (1997). Portanto, os estômatos das plantas desempenham um papel importante na fotossíntese e na evapotranspiração. Em ambientes semi-áridos tais como o Nordeste, onde a estação chuvosa pode ser breve e variável, a regulação da água é primordial para a sobrevivência das plantas, o que faz com que a resistência estomática seja um importante parâmetro, a qual afeta a partição de energia em calor latente e calor sensível.

No esquema de superfície SSiB, os parâmetros responsáveis pelo controle estomático e, conseqüentemente, pela evapotranspiração, são os coeficientes de resistência estomática

para a radiação fotossinteticamente ativa (a , b e c), a fração de cobertura vegetal (V_c) e a fração de folha verde no dossel (N_c). As variações nos parâmetros a , b e c tiveram um efeito pouco significativo nos resultados dos testes de sensibilidade, ou seja, não contribuíram para alterações significativas nos fluxos de energia. Porém, observou-se que maiores valores dos coeficientes de resistência estomática a e c , conduziram a reduções nos fluxos de calor latente, especialmente durante os meses mais secos, em que o conteúdo de água no solo é menor. Essa redução no LE está associada ao aumento forçado na resistência estomática. Já com as variações no coeficiente de resistência estomática b , a alteração no fluxo de LE foi contrária, ou seja, o aumento no coeficiente b ocasionou um aumento no LE devido à redução gerada na resistência estomática.

Com as alterações nos parâmetros V_c e N_c , os resultados obtidos foram similares àqueles do L_c , com alterações mínimas nos fluxos de energia. A redução de 99% do valor inicial do parâmetro N_c implicou em uma diminuição média no fluxo de calor latente de 5,2% nos meses do período seco. Nos meses representativos da estação chuvosa, a mesma redução do parâmetro N_c conduziu a erros da ordem de 3,6% nos fluxos de calor latente. Nos fluxos de calor sensível, as alterações no parâmetro N_c não conduziram a mudanças significativas. Considerando um aumento de 100% no parâmetro V_c (de 0,10 para 0,20), obteve-se um aumento médio de 5% nos fluxos de calor latente nos meses representativos da estação seca. Essa variação do parâmetro V_c afetou minimamente os fluxos de energia nos meses úmidos. A redução de 50% no parâmetro V_c conduziu a uma diminuição de aproximadamente 6% no fluxo de calor latente no mês de setembro de 2004 e a uma redução de aproximadamente 3% no fluxo de calor sensível no mês de março de 2005. Com o aumento da resistência estomática (r_c), os fluxos de LE diminuem e os de H aumentam. Durante os meses mais secos a vegetação é menos densa e o impacto de r_c é mais alto nos meses chuvosos. De modo geral, H é determinado primariamente pelo saldo de radiação disponível e, secundariamente pela quantidade de energia particionada para LE.

Conforme ressaltou Oyama (2002), as alterações no comprimento de rugosidade (z_0) podem afetar os fluxos turbulentos. A redução (aumento) de z_0 está associada a uma

menor (maior) eficiência nos processos de trocas turbulentas, ou seja, tende a diminuir (aumentar) os fluxos de calor sensível e latente. O aumento em z_0 tende a reduzir a resistência aerodinâmica e favorecer o aumento das trocas turbulentas de quantidade de movimento (momentum). No presente estudo observou-se, a partir das variações efetuadas em z_0 (aumento de 100% e redução de 50% no valor inicial), que não ocorreram mudanças significativas nos fluxos de calor latente durante ambos os períodos seco e úmido. A maior variação ocorreu no mês de março de 2005, em que uma redução da ordem de 50% em z_0 ocasionou uma redução de aproximadamente 6% nos fluxos de calor sensível. Nos fluxos de calor latente, o maior aumento observado foi de 1,4% em março de 2005.

Assim como o parâmetro z_0 , o deslocamento do plano zero (d) é utilizado no cálculo das resistências aerodinâmicas, as quais governam a transferência de umidade e de calor sensível. Quando o parâmetro d foi alterado (aumento de 100% e redução de 50% no valor inicial), as respostas mais significativas ocorreram nos fluxos de calor sensível. No mês de fevereiro de 2005, o aumento induzido em d levou a uma redução da ordem de 6% no fluxo de calor sensível. Essa redução em H está associada à redução da resistência aerodinâmica.

Aumento e redução (de 100% e 50%, respectivamente) nos parâmetros T_0 , h_5 , ψ_1 e ψ_2 implicaram, em média, em erros inferiores a 5% nos fluxos de calor latente, de calor sensível e de calor no solo. Os pequenos impactos das variações desses parâmetros, bem como dos parâmetros anteriores, nos fluxos calculados pelo modelo SSiB podem estar relacionados à escala mensal utilizada na análise dos resultados.

Estudos têm mostrado que as propriedades do solo podem ter um impacto substancial nas simulações do esquema SSiB (Xue et al., 1996a, b, c). Em geral, no estudo de sensibilidade realizado, os parâmetros do solo B , ψ_s , K_s e θ_s foram os que conduziram a maiores variações nos fluxos de calor sensível e calor latente.

A função do parâmetro B no esquema de superfície SSiB é bastante complexa, uma vez que este parâmetro tem vários mecanismos que podem afetar a evaporação da superfície. Nos meses úmidos, valores maiores do parâmetro B reduzem a condutividade hidráulica do solo (Eq. 3.19), o que faz com que o escoamento também seja reduzido e, conseqüentemente, ocorre maior evaporação. Isso pode ser verificado nos resultados dos testes de sensibilidade para os meses de fevereiro e março de 2005, em que um aumento de 100% nos valores iniciais do parâmetro B resultou em um aumento médio de 18% nos fluxos de calor latente e uma redução média de 36% nos fluxos de calor sensível. Nos meses mais secos, a mesma variação no parâmetro B tem um efeito contrário, ou seja, os fluxos de calor latente reduzem da ordem de 44% e os fluxos de calor sensível aumentam aproximadamente 28%, em decorrência do baixo conteúdo de água no solo.

Condutividade hidráulica do solo à saturação (K_s) mais alta produz maior condutividade hidráulica, a qual pode aumentar a drenagem, reduzindo então o conteúdo de água total no solo. De fato, condutividade hidráulica alta pode também aumentar a infiltração na superfície; portanto, aumenta a umidade no solo. Conforme ressaltado em Xue et al. (1996d), a condutividade hidráulica influi ainda indiretamente na taxa de infiltração através das equações de difusão da água entre as camadas do solo (Eq. 3.17). Um aumento de 100% do valor inicial de K_s conduziu a um aumento da ordem de 24% nos fluxos de calor latente nos meses secos, considerando a média dos meses de julho a setembro. Com o aumento de K_s há um aumento no fluxo de água entre as camadas do solo, o que reativa a camada mais baixa (3^a camada do solo) e conseqüentemente, aumenta a evaporação.

Valores altos de potencial de água no solo à saturação (ψ_s) produzem maiores valores de potencial de água no solo, o que auxilia na transferência de água à superfície para a evaporação (Eq. 3.18). Quando o parâmetro ψ_s foi alterado de -0,035 para -0,07, os fluxos de calor latente aumentaram em torno de 30% enquanto os fluxos de calor sensível reduziram em aproximadamente 17% nos meses mais secos. No período mais

úmido, com a alteração de ψ_s para -0,0175, o aumento nos fluxos de calor latente foi de aproximadamente 10% e a redução nos fluxos de calor sensível de 12%.

Com relação à porosidade do solo (θ_s), com seu valor duplicado, observou-se um aumento médio de 36% nos fluxos de calor latente nos meses secos e uma redução média de 14% nos fluxos de calor sensível. Para os meses úmidos, o aumento nos fluxos de calor latente foi de aproximadamente 8% e a redução nos fluxos de calor sensível foi de 10%. Esse aumento nos fluxos pode estar relacionado à redução do potencial de água no solo (Eq. 3.18) o que deve ocorrer principalmente na 2^a camada de solo, provocando a ascensão.

Os parâmetros K_s , ψ_s , B e θ_s , que estão relacionados com as propriedades hidráulicas do solo, quando variados, ocasionaram maiores alterações nos fluxos de calor no solo durante os meses mais úmidos. Porém, na escala mensal, como a média do fluxo de calor no solo geralmente é próxima de zero, os altos valores do percentual de variações encontrados não implicaram em grandes alterações. No mês de janeiro de 2005, quando o parâmetro B é duplicado, o fluxo de calor no solo teve uma variação da ordem de 170%, o que equivale a uma redução de apenas $2,5 \text{ W m}^{-2}$. Com isso, as variações consideradas nos parâmetros do solo, bem como nos parâmetros da vegetação, não ocasionaram impactos significativos no cálculo dos fluxos de calor no solo.

Através dos testes de sensibilidade efetuados, verificou-se que os aumentos e reduções nos parâmetros da vegetação do modelo SSiB não implicaram em variações significativas nos fluxos de superfície. Uma explicação para esse fato é que todos os testes de sensibilidade estão comprometidos com uma grande restrição que é o parâmetro V_c ser igual a 0,10, ou seja, os parâmetros fisiológicos e morfológicos de fato não vão ter grande influência, pois o bioma é praticamente apenas solo.

4.4 Calibração dos parâmetros

Os parâmetros físicos, morfológicos e fisiológicos do esquema SSiB são utilizados para derivar os coeficientes e as resistências que governam as transferências de momentum, de radiação, de fluxos de calor sensível e calor latente. Todos esses fluxos dependem do estado da cobertura vegetal e das condições atmosféricas. O cálculo das resistências estomáticas no modelo SSiB é de vital importância para a estimativa da transferência de vapor d'água da superfície para a atmosfera. Os parâmetros fisiológicos importantes usados no cálculo dessas resistências são o índice de área foliar (L_c), a fração de folha verde (N_c), a fração de cobertura vegetal (V_c), os coeficientes de resistência estomática à radiação fotossinteticamente ativa (a , b e c), a porosidade (θ_s), o parâmetro B , condutividade hidráulica a saturação (K_s) e o parâmetro de resposta estomática à pressão de vapor d'água (h_5). Para a calibração foram utilizados alguns parâmetros relacionados com a transferência de calor latente e calor sensível entre a superfície e a atmosfera.

Os parâmetros iniciais necessários para a calibração foram obtidos da classificação tipo 8 do modelo SiB (Sellers et al. 1989), uma vez que esse bioma é o que mais se assemelha ao da caatinga do Nordeste do Brasil. Como muitos dos parâmetros do esquema variam sazonalmente, o procedimento de calibração dos parâmetros sazonais foi realizado para cada mês do ano. A calibração foi realizada utilizando-se um período completo de dados mensais para o período de julho a novembro de 2004 e para o mês de junho de 2005. Em relação aos demais meses do ano utilizou-se um número reduzido de dados devido à falta de informações. Para a calibração dos meses de dezembro de 2004, janeiro de 2005, fevereiro de 2005, março de 2005, abril de 2005 e maio de 2005, utilizaram-se 7, 22, 11, 10, 13 e 21 dias de dados, respectivamente.

Os resultados do processo de otimização para os parâmetros fixos são apresentados na Tabela 4.12. Para a calibração dos parâmetros fixos foram utilizadas medidas micrometeorológicas do mês de julho de 2004. Após a calibração, a resistência estomática à radiação fotossinteticamente ativa (c) reduziu de aproximadamente 20% do

seu valor inicial, o potencial de água no solo à saturação (ψ_s) tornou-se uma ordem de magnitude maior e a condutividade hidráulica à saturação (K_s) reduziu 18% do seu valor inicial. Os demais parâmetros fixos não apresentaram alterações significativas após o processo de calibração.

Tabela 4.12 – Resultados do processo de otimização dos parâmetros fixos

Parâmetros fixos		
	<i>Inicial</i>	<i>Calibrado</i>
Parâmetros de resistência estomática à radiação PAR		
$a (Jm^{-3})$	93989,42	93992,74
$b (Wm^{-2})$	0,0100	0,0099
$c (sm^{-1})$	855,00	672,35
Déficit de pressão de vapor d'água - $h_5 (hPa^{-1})$		
	0,0275	0,0279
Parâmetros do potencial de água no solo		
$\psi_1 (m)$	1,9200	1,9196
$\psi_2 (m)$	5,6100	5,6098
Parâmetro B		
Potencial de água no solo à saturação - $\psi_s (m)$	-0,0350	-0,0029
Porosidade - $\theta_s (m^3 m^{-3})$	0,4352	0,4323
Condutividade hidráulica à saturação - $K_s (ms^{-1})$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,64 \times 10^{-4}$

As Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os resultados do processo de otimização dos parâmetros sazonais para o período de julho 2004 a junho de 2005, respectivamente. O desvio médio quadrático foi calculado pela Equação 3.25.

Nos meses de julho, outubro e dezembro de 2004, os parâmetros sazonais não apresentaram alterações significativas. Já no mês de agosto de 2004, o parâmetro fração de cobertura vegetal (V_c) foi o que apresentou uma alteração mais significativa (da ordem de 5 %), enquanto que os demais parâmetros apresentaram pouca variação. Para o mês de setembro de 2004, a variação mais expressiva foi no parâmetro comprimento de rugosidade (z_0), sendo que após a calibração z_0 reduziu cerca de 7% do seu valor inicial. Após a calibração dos parâmetros do mês de novembro de 2004, L_c e V_c

apresentaram um aumento nos seus valores iniciais de aproximadamente 4% e 5%, respectivamente. Nos meses de janeiro a junho de 2005, o parâmetro V_c foi o que mais se alterou, aumentando da ordem de 8 % no mês de junho.

Tabela 4.13 – Resultados do processo de otimização dos parâmetros sazonais (Ano 2004)

Parâmetros sazonais		
Julho de 2004		
	<i>Inicial</i>	<i>Calibrado</i>
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,5780	0,5775
Fração de folha verde - N_c	0,7979	0,7977
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,0991
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2447	0,2444
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,8126	2,8126
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	121,7	86,5
Agosto de 2004		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,5780	0,5817
Fração de folha verde - N_c	0,5319	0,5332
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,1043
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2447	0,2459
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,8126	2,8127
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	53,0	31,1
Setembro de 2004		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,4480	0,4491
Fração de folha verde - N_c	0,3623	0,3628
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,1001
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2447	0,2275
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,6623	2,6623
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	95,9	54,5
Outubro de 2004		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,2880	0,2908
Fração de folha verde - N_c	0,5682	0,5687
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,1016
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,1999	0,2005
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,3909	2,3909
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	148,8	140,0
Novembro de 2004		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,2580	0,2701
Fração de folha verde - N_c	0,5682	0,5700
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,1062
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,1999	0,2021
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,3909	2,3911
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	1062,1	1053,6
Dezembro de 2004		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,2580	0,2596
Fração de folha verde - N_c	0,5682	0,5684
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,1001
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,1999	0,2002
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,3909	2,3909
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	190,7	69,7

Tabela 4.14 – Resultados do processo de otimização dos parâmetros fixos (Ano 2005)

Parâmetros sazonais		
Janeiro de 2005		
	<i>Inicial</i>	<i>Calibrado</i>
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,2580	0,2665
Fração de folha verde - N_c	0,5682	0,5679
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,0985
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,1999	0,1993
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,3909	2,3909
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	317,6	304,9
Fevereiro de 2005		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,8080	0,8072
Fração de folha verde - N_c	0,8681	0,8677
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,0980
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2674	0,2667
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,9746	2,9745
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	245,7	113,1
Março de 2005		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	1,5080	1,5078
Fração de folha verde - N_c	0,6506	0,6503
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,0989
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2923	0,2920
Deslocamento do plano 0 - D (m)	3,1377	3,1377
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	171,0	146,0
Abril de 2005		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	1,1480	1,1468
Fração de folha verde - N_c	0,5155	0,5142
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,0956
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2803	0,2790
Deslocamento do plano 0 - D (m)	3,0625	3,0624
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	245,9	49,7
Mai de 2005		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,7480	0,7496
Fração de folha verde - N_c	0,6303	0,6309
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,1023
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2581	0,2587
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,9074	2,9075
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	226,6	109,7
Junho de 2005		
Índice de área foliar - L_c ($m^2 m^{-2}$)	0,5780	0,5856
Fração de folha verde - N_c	0,7979	0,7997
Fração de cobertura vegetal - V_c	0,1000	0,1088
Comprimento de rugosidade - Z_0 (m)	0,2447	0,2473
Deslocamento do plano 0 - D (m)	2,8126	2,8128
Desvio médio quadrático (Wm^{-2})	190,0	173,8

De modo geral, nota-se que após a calibração as variações nos parâmetros sazonais foram pequenas. Essas pequenas alterações nos parâmetros podem estar relacionadas ao fato dos parâmetros iniciais já serem representativos do bioma caatinga, tal que o algoritmo não alcance melhores resultados.

Na calibração dos parâmetros sazonais para os meses de julho a dezembro de 2004, o desvio médio quadrático (Tabela 4.13), diminuiu cerca de 30% no mês de julho, 40% nos meses de agosto e de setembro, aproximadamente 6% no mês de outubro e 1% no mês de novembro. No entanto, a maior redução do desvio médio do erro é observado no mês de dezembro (63%).

As Figuras 4.8 a 4.13 apresentam o ciclo diurno médio dos fluxos de calor latente e calor sensível com os parâmetros calibrados para os meses de julho a dezembro de 2004. Pode-se observar que os erros nos fluxos de calor sensível diminuíram, aproximando os fluxos calculados pelo modelo com aqueles medidos. Outrossim, observa-se que com a simulação utilizando os parâmetros iniciais o fluxo de calor latente foi severamente superestimado, especialmente durante o intervalo das 06 às 18 HL (Figuras 4.4 e 4.6). Com os parâmetros calibrados, principalmente pela redução no parâmetro K_s e aumento no parâmetro ψ_s que, em consonância com o estudo de sensibilidade, tem o efeito de reduzir a evaporação, a diferença entre o fluxo de calor latente (LE) simulado e calculado é reduzida. Porém, mesmo após a calibração, a principal diferença entre os fluxos calculados e os fluxos observados continuou ocorrendo principalmente durante o intervalo das 06 às 18 HL, quando o saldo de radiação é maior.

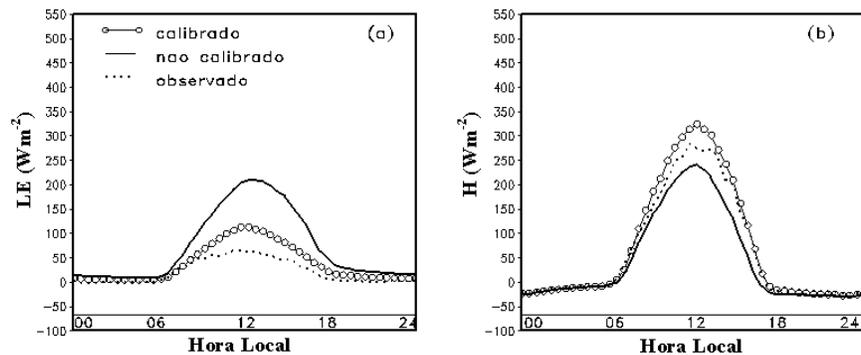


Figura 4.8 – Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Julho de 2004).

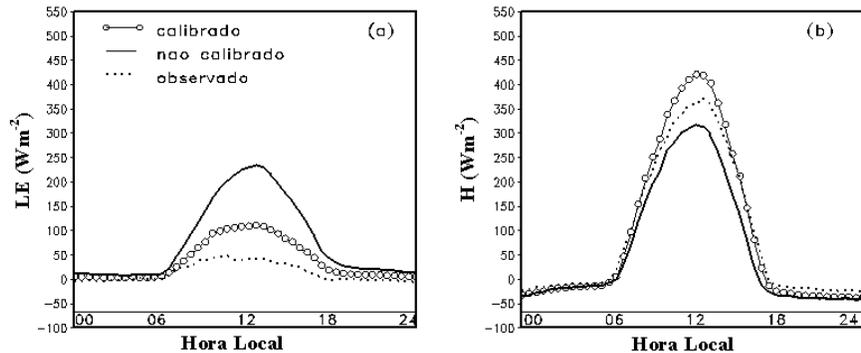


Figura 4.9 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Agosto de 2004).

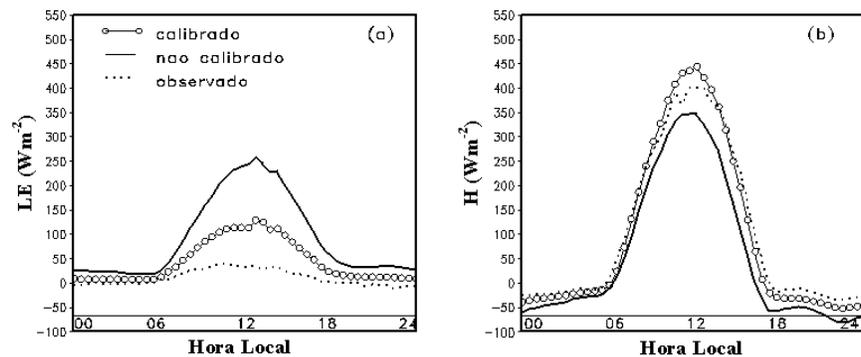


Figura 4.10 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Setembro de 2004).

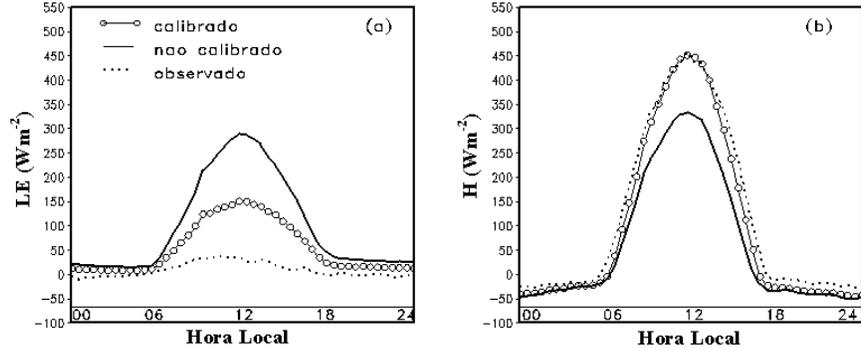


Figura 4.11 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Outubro de 2004).

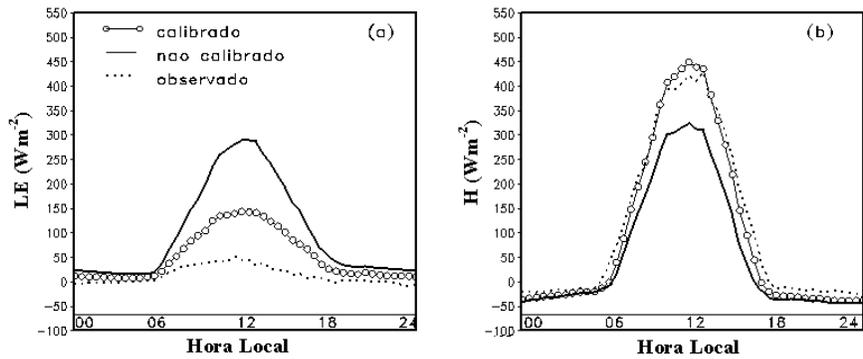


Figura 4.12 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Novembro de 2004).

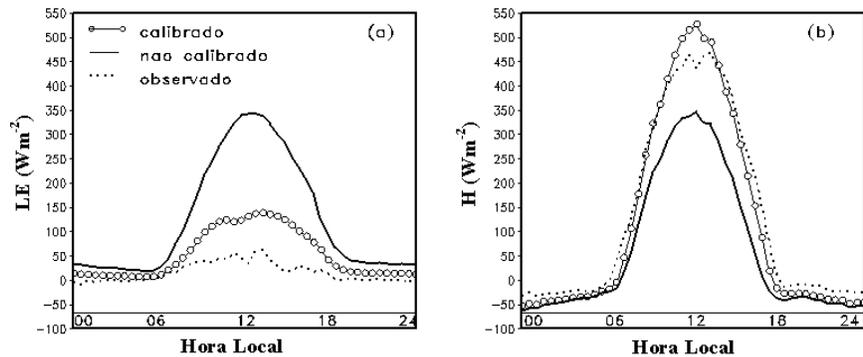


Figura 4.13 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Dezembro de 2004).

Assim como ocorreu nos meses de julho a dezembro de 2004, os parâmetros sazonais nos meses de janeiro a junho de 2005 também apresentaram poucas alterações no processo de otimização. O desvio médio do erro (Tabela 4.14) diminuiu pouco nos meses de janeiro, março e junho (inferior a 15%). No mês de fevereiro, o desvio médio reduziu cerca de 54%, enquanto para os meses de abril e maio, ele diminuiu de aproximadamente 80% e 52%, respectivamente. As pequenas alterações nos parâmetros durante a otimização podem estar relacionadas a dois fatores: primeiro, os parâmetros iniciais já são representativos do bioma, tal que o algoritmo não alcance melhores resultados; segundo, os fluxos de calor latente e calor sensível utilizados na calibração foram obtidos a partir da utilização de anemômetro sônico, através do sistema de correlação de vórtices turbulentos. Embora esse método tenha sido usado satisfatoriamente em vários experimentos na Amazônia e providos dados para outras calibrações (Sellers et al., 1989; Rocha et al., 1996; Correia et al., 2005), ele não garante o fechamento do balanço de energia, podendo, assim, contribuir para possíveis discrepâncias no procedimento de calibração.

As figuras 4.14 a 4.19 apresentam o ciclo diurno médio dos fluxos de calor latente e calor sensível utilizando-se parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados para os meses de janeiro a junho de 2005. Os erros nos fluxos de calor latente e calor sensível foram reduzidos utilizando-se os parâmetros calibrados. Esses resultados mostram mais uma vez que, com os parâmetros calibrados, o modelo simulou satisfatoriamente os fluxos de superfície. Entretanto, conforme também observado com as simulações para os meses de julho a dezembro de 2004, mesmo após a calibração a principal diferença entre os fluxos calculados e os fluxos observados continuou ocorrendo durante o dia. Essa diferença significativa ainda observada pode estar relacionada a dois fatores: primeiro, às limitações no algoritmo utilizado no processo de calibração; segundo, às possíveis incertezas nos dados observacionais.

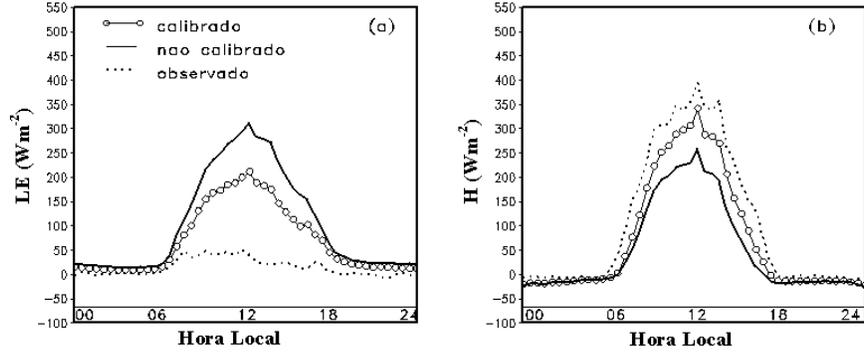


Figura 4.14 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Janeiro de 2005).

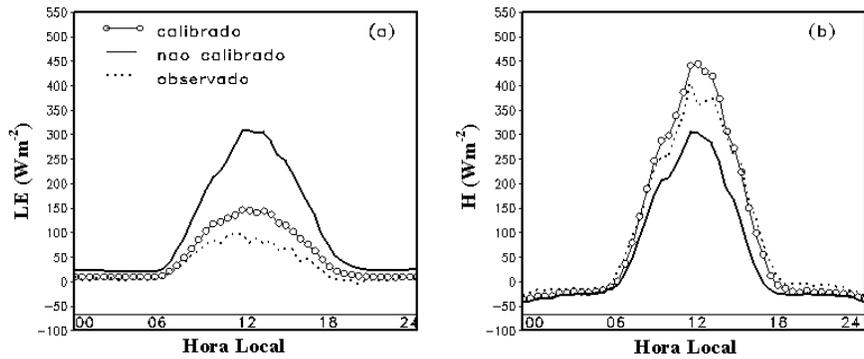


Figura 4.15 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Fevereiro de 2005).

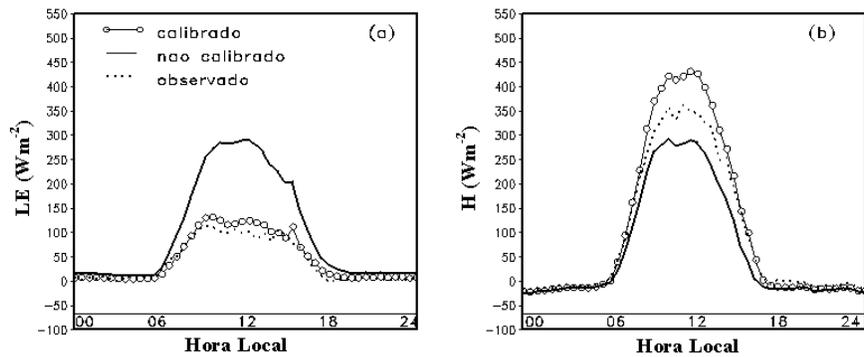


Figura 4.16 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Março de 2005).

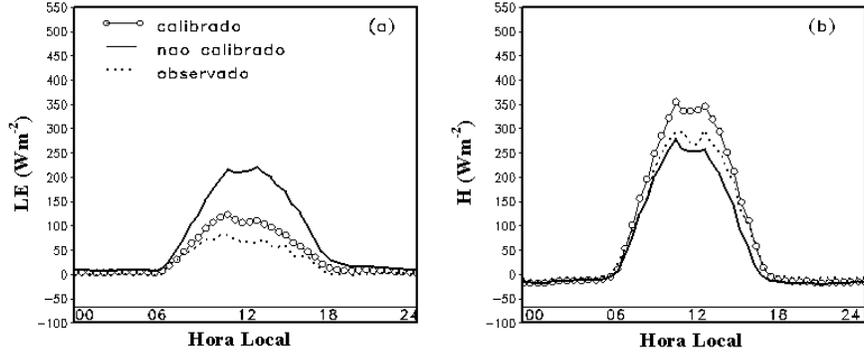


Figura 4.17 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Abril de 2005).

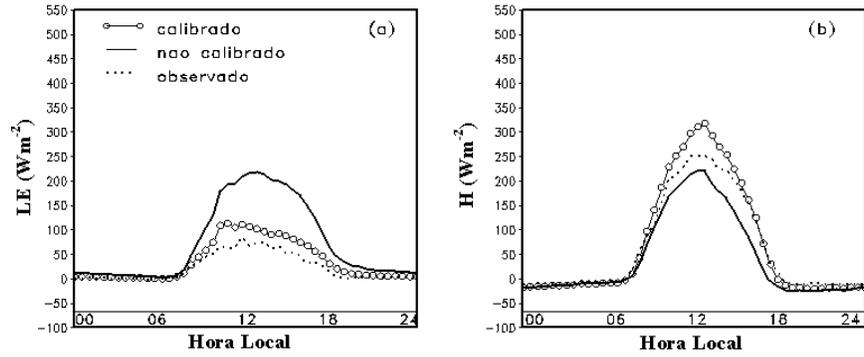


Figura 4.18 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Maio de 2005).

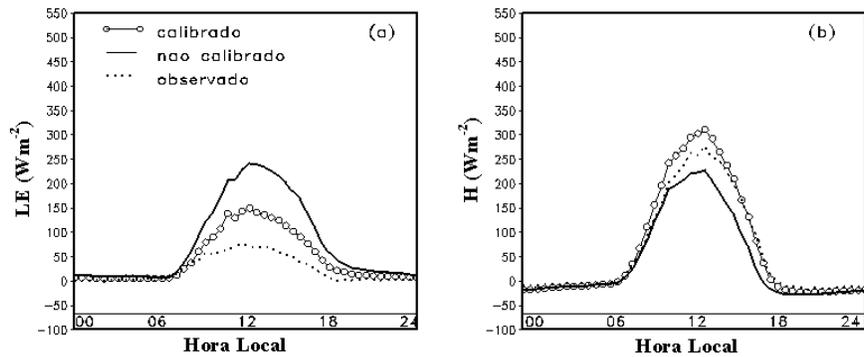


Figura 4.19 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (Junho de 2005).

A Tabela 4.15 apresenta os componentes do balanço de energia após o procedimento de calibração dos parâmetros para o bioma caatinga para os meses de julho a dezembro de 2004. Na média, os fluxos de calor latente apresentaram uma redução de aproximadamente 50%, e os fluxos de calor sensível um aumento de aproximadamente 40%, diminuindo o desvio com relação aos fluxos observados. O saldo de radiação apresentou pequena redução, enquanto o fluxo de calor no solo não foi significativamente alterado. Outrossim, ressalta-se que o melhor ajuste com os parâmetros calibrados foi observado no cálculo do fluxo de calor latente.

Tabela 4.15 – Resultados estatísticos do processo de calibração (Ano 2004)

RESULTADOS ESTATÍSTICOS - 2004								
Julho								
	Calculado				Observado			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	107,22	73,26	43,49	-9,53	101,18	20,06	63,35	-1,00
<i>Calibrado</i>	101,98	37,59	71,59	0,04				
	Erro Médio				DMO			
<i>Não calibrado</i>	6,04	53,20	-19,86	-8,53	19,43	73,70	34,81	41,71
<i>Calibrado</i>	0,80	17,53	8,24	-6,20	14,91	28,71	30,35	40,17
Agosto								
	Calculado				Observado			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	136,02	78,47	61,80	-4,25	127,20	12,48	90,24	3,38
<i>Calibrado</i>	130,15	38,59	94,25	-2,68				
	Erro Médio				DMO			
<i>Não calibrado</i>	8,83	65,99	-28,44	-7,63	21,45	91,76	41,55	37,50
<i>Calibrado</i>	2,95	26,11	4,01	-6,07	16,80	42,93	37,74	36,12
Setembro								
	Calculado				Observado			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	146,61	93,41	56,97	-3,76	131,75	9,62	101,94	2,05
<i>Calibrado</i>	139,40	44,46	97,13	-2,19				
	Erro Médio				DMO			
<i>Não calibrado</i>	14,87	83,79	-44,96	-5,81	27,09	111,76	59,59	38,75
<i>Calibrado</i>	7,65	34,84	-4,52	-4,23	19,16	54,11	40,51	37,19
Outubro								
	Calculado				Observado			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	162,48	100,61	63,26	-1,39	144,64	8,26	117,77	4,53
<i>Calibrado</i>	154,12	54,82	99,57	-0,27				
	Erro Médio				DMO			
<i>Não calibrado</i>	17,84	92,35	-54,51	-5,92	23,60	130,39	78,70	40,19
<i>Calibrado</i>	9,48	46,56	-18,20	-4,79	16,64	72,18	49,58	39,00
Novembro								
	Calculado				Observado			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	159,77	101,47	59,65	-1,35	142,24	12,51	109,57	3,61
<i>Calibrado</i>	150,96	53,12	97,82	0,02				
	Erro Médio				DMO			
<i>Não calibrado</i>	17,53	88,96	-49,92	-4,95	25,95	127,72	89,59	42,08
<i>Calibrado</i>	8,74	40,62	-11,74	-3,58	20,32	60,82	43,66	54,13
Dezembro								
	Calculado				Observado			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	186,82	126,52	63,51	-3,22	170,57	16,66	130,12	11,87
<i>Calibrado</i>	175,84	61,84	112,43	1,56				
	Erro Médio				DMO			
<i>Não calibrado</i>	16,22	109,55	-66,46	-14,96	19,85	150,79	96,25	43,11
<i>Calibrado</i>	5,25	45,04	-17,63	-10,27	9,80	66,97	49,25	54,71

A Tabela 4.16, apresenta os componentes do balanço de energia após o procedimento de calibração dos parâmetros do esquema SSiB para os meses de janeiro a junho de 2005. Assim como observado para os meses de julho a dezembro de 2004, na média, os fluxos de calor latente apresentaram uma redução de aproximadamente 45%, enquanto os fluxos de calor sensível aumentaram aproximadamente 37%. O saldo de radiação apresentou pequena redução e o fluxo de calor no solo não foi significativamente alterado.

Esses resultados mostraram mais uma vez que os parâmetros ajustados são mais apropriados para representar os processos de transferência turbulenta entre a superfície e a atmosfera para o bioma caatinga do Nordeste do Brasil.

Tabela 4.16 – Resultados estatísticos do processo de calibração (Ano 2005)

RESULTADOS ESTATÍSTICOS – 2005								
Janeiro								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	148,77	104,19	48,62	-4,05	130,23	13,75	103,90	-0,25
<i>Calibrado</i>	142,52	72,87	70,52	-0,88				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMO</i>			
<i>Não calibrado</i>	18,54	90,44	-55,28	-3,79	25,36	133,73	90,91	45,09
<i>Calibrado</i>	11,57	62,53	-36,77	-1,77	19,35	94,40	66,99	44,18
Fevereiro								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	159,27	105,32	56,08	-2,13	150,05	30,91	94,43	6,88
<i>Calibrado</i>	149,40	49,76	98,34	-5,58				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMO</i>			
<i>Não calibrado</i>	9,21	74,41	-38,36	-9,01	15,02	108,00	57,17	40,69
<i>Calibrado</i>	-0,65	18,85	3,91	-5,58	11,97	32,83	37,37	39,88
Março								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	166,24	101,46	66,34	-1,56	161,17	39,61	93,77	3,89
<i>Calibrado</i>	157,22	47,19	108,43	1,61				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMO</i>			
<i>Não calibrado</i>	5,07	61,85	-27,43	-5,45	15,45	94,79	46,11	40,49
<i>Calibrado</i>	-3,94	7,58	14,67	-2,29	18,63	28,86	40,62	39,68
Abril								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	129,82	73,81	60,05	-4,03	123,49	23,56	74,93	3,64
<i>Calibrado</i>	121,51	27,62	95,17	-1,28				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMO</i>			
<i>Não calibrado</i>	6,33	50,25	-14,88	-7,68	13,02	74,59	33,51	38,46
<i>Calibrado</i>	-1,98	4,07	20,24	-4,92	12,28	15,12	48,07	37,37
Maio								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	112,08	74,40	44,00	-6,31	100,75	23,10	62,17	0,34
<i>Calibrado</i>	105,61	37,09	72,28	-3,76				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMO</i>			
<i>Não calibrado</i>	11,33	51,30	-18,17	-6,65	25,47	78,42	42,14	37,41
<i>Calibrado</i>	4,85	13,99	10,10	-4,09	23,00	34,19	39,97	36,00
Junho								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	115,56	74,85	46,75	-6,04	99,17	22,52	63,24	-0,66
<i>Calibrado</i>	111,05	47,14	68,60	-4,69				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMO</i>			
<i>Não calibrado</i>	16,40	52,33	-16,49	-5,39	29,61	82,45	36,62	36,99
<i>Calibrado</i>	11,89	24,62	5,36	-4,03	26,88	51,36	38,66	35,90

Para fins de comparação, apresentam-se na Tabela 4.17 os valores de alguns parâmetros da vegetação e do solo da estação chuvosa da classificação tipo 8 considerado por Sellers et al. (1989), os valores calibrados utilizando dados dos experimentos SEBEX e HAPEX-Sahel por Kahan et al. (2006) e os mesmos parâmetros calibrados considerando os dados da caatinga brasileira obtidos no escopo do presente trabalho. Como pode se r observado, os valores encontrados para os parâmetros especificados abaixo para a caatinga brasileira são mais próximos aos valores de Dorman e Sellers (1989), uma vez que estes foram obtidos para vegetação similar ao da caatinga do Brasil (Klink e Wilmott, 1985; Wilmott e Klink, 1986). Outrossim, ressalta-se que os valores de Kahan et al. (2006) não foram calibrados pelo mesmo método utilizado no presente trabalho.

Tabela 4.17 – Comparação dos parâmetros da vegetação e do solo

Parâmetros		Dorman e Sellers (1989)	Kahan et al. (2006) - Sahel		Caatinga do NEB
Índice de área foliar	Ago.	0,808	1,508	Fev.	0,807
	Set.	1,508	2,008	Mar.	1,508
	Out.	1,148	0,622	Abr.	1,147
Resistência estomática mínima ($s\ m^{-1}$)		855,00	81,5		672,35
Condutividade hidráulica à saturação ($m\ s^{-1}$)		$0,176 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-3}$		$0,164 \times 10^{-3}$

4.5 Validação dos fluxos de superfície

Uma questão que se levanta é se os parâmetros que foram calibrados considerando um período de dados apresentam o mesmo desempenho (melhora na estimativa dos fluxos turbulentos) se forem utilizados na simulação para outro período. Assim, após a calibração do esquema de superfície SSiB realizou-se a validação dos fluxos de superfície. Para isto, foram considerados os fluxos de superfície observados do período seco do ano de 2005 (julho a setembro) para validar os parâmetros calibrados para o mesmo período do ano anterior (julho a setembro de 2004). A qualidade da validação

foi avaliada de acordo com o erro médio, com o desvio médio quadrático (DMQ) e com a correlação entre os dados simulados e os dados observados (r).

Os fluxos calculados de saldo de radiação (R_n), de calor latente (λE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G) versus os observados para o período de julho a setembro de 2005 antes da calibração e após a calibração são apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21, respectivamente.

Com os parâmetros iniciais, o modelo simulou bem o saldo de radiação (R_n) e o fluxo de calor sensível (H), apresentando alta correlação. O modelo não estimou bem o fluxo de calor latente (LE) e o fluxo de calor no solo (G), o que pode ser verificado com os baixos valores dos coeficientes de correlação, iguais a 0,56 para LE e 0,68 para G (ver Figura 4.20). O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo SSiB produziu melhores resultados na determinação dos fluxos de superfície, com coeficientes de correlação iguais a 0,60 para LE e 0,73 para G (ver Figura 4.21), ainda que r para LE não seja satisfatório.

As Figuras 4.22 a 4.24 apresentam os ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente e de calor sensível com os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados no ano de 2005. Pode-se observar que os erros nos fluxos de calor latente também diminuíram, mostrando assim que existe uma redução na diferença entre os fluxos calculados e os observados, após o ajuste dos parâmetros. Para o fluxo de calor sensível, o erro também diminuiu com os novos parâmetros.

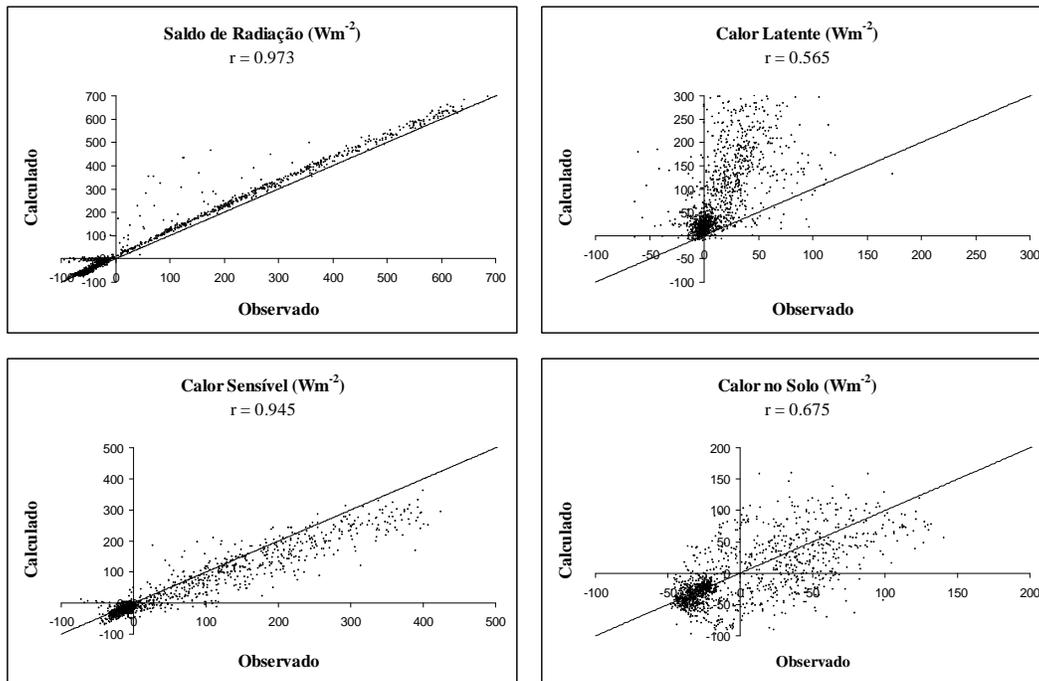


Figura 4.20 – Fluxos calculados de saldo de radiação, de calor latente, de calor sensível e calor no solo versus os observados – antes da calibração (julho a setembro de 2005).

A Tabela 4.18 apresenta os componentes do balanço de energia, utilizando os parâmetros não calibrados e calibrados referentes ao ano de 2004. Nesta tabela, os fluxos correspondem aos valores médios para o período de 28 dias de integração no mês de julho de 2005, 31 dias de integração no mês de agosto de 2005 e 16 dias no mês de setembro de 2005. Nota-se que os desvios entre os fluxos turbulentos de calor latente e de calor sensível calculados e os observados para os meses de julho a setembro de 2005 também apresentaram reduções. Para LE, a redução no erro médio foi em torno de $28 W m^{-2}$ para o mês de julho, cerca de $42 W m^{-2}$ para o mês de agosto e de aproximadamente $52 W m^{-2}$ para o mês de setembro. Para H, a redução no erro médio foi de aproximadamente $21 W m^{-2}$ para o mês de julho, de $33 W m^{-2}$ para o mês de agosto e de $40 W m^{-2}$ para o mês de setembro. O saldo de radiação e o fluxo de calor no solo, como em 2004, também não apresentaram mudanças significativas. Isso de certa forma é esperado, pois os parâmetros que foram utilizados na calibração são usados diretamente no cálculo dos fluxos de calor latente e de calor sensível. A redução entre

os fluxos calculados e os observados pode ser verificada também no cálculo do desvio médio quadrático (DMQ), que apresentam reduções médias de aproximadamente 52 W m^{-2} nos fluxos de calor latente e de 10 W m^{-2} nos fluxos de calor sensível. Contudo, mostrou-se que os parâmetros que foram calibrados considerando um período de dados de 2004 apresentaram o mesmo desempenho quando utilizados na simulação para um outro período de dados do ano seguinte (2005), ou seja, o novo conjunto de parâmetros conduziu a uma melhoria nas simulações dos fluxos de superfície.

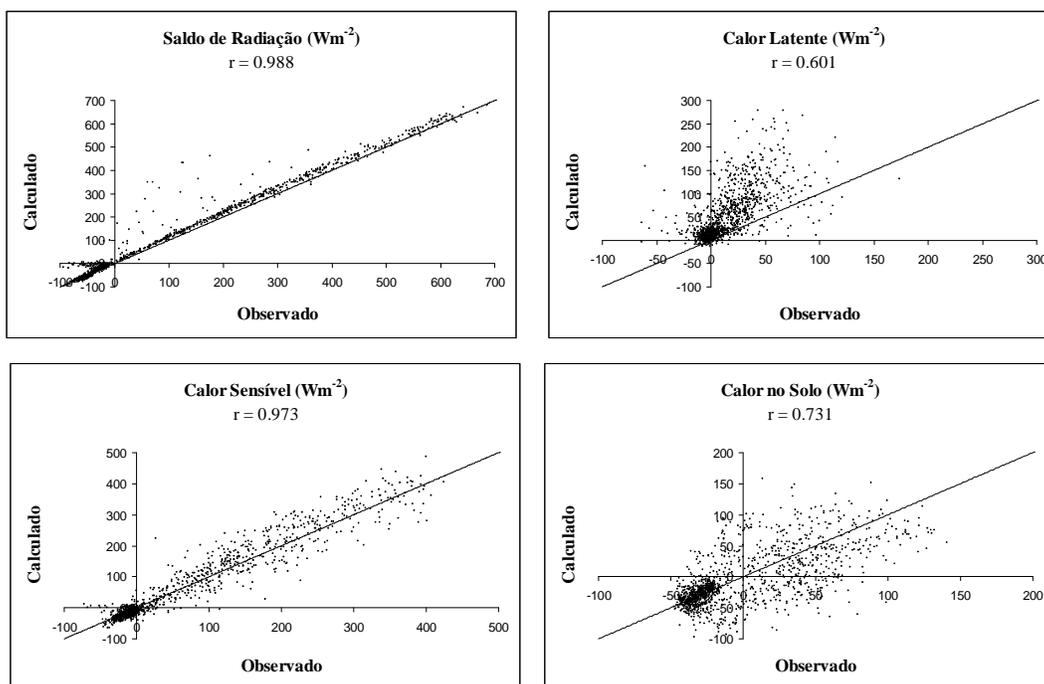


Figura 4.21 - Fluxos calculados de saldo de radiação, de calor latente, de calor sensível e calor no solo versus os observados – após a calibração (julho a setembro de 2005).

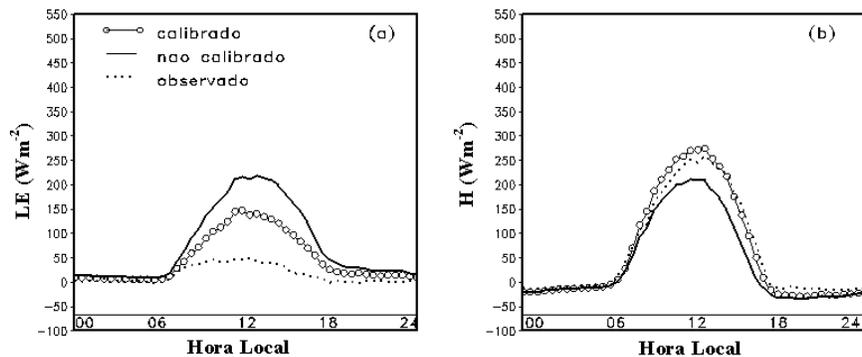


Figura 4.22 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (julho de 2005).

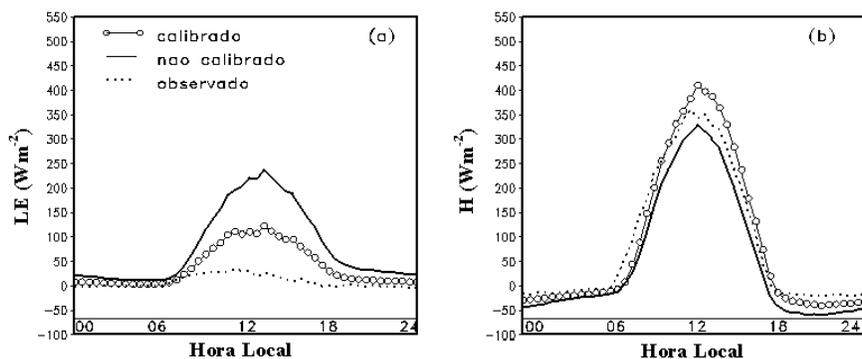


Figura 4.23 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (agosto de 2005).

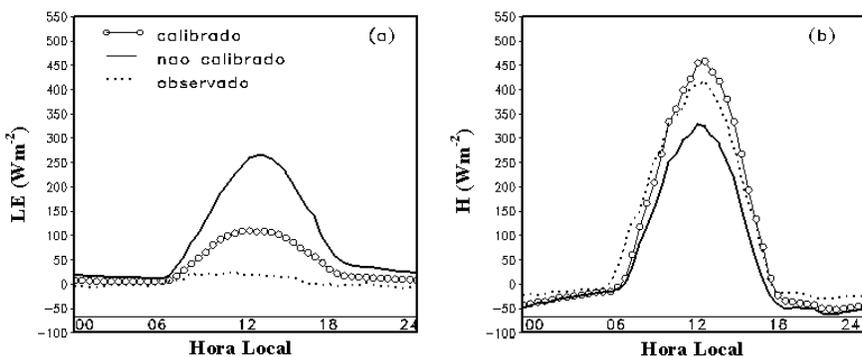


Figura 4.24 Ciclos diurnos médios dos fluxos de calor latente (a) e de calor sensível (b) utilizando os parâmetros não calibrados, calibrados e os fluxos observados (setembro de 2005).

Tabela 4.18 – Resultados estatísticos do processo de validação (Ano 2005)

Julho								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	109,85	77,39	40,72	-8,26	92,87	14,44	63,09	-0,41
<i>Calibrado</i>	105,27	49,27	62,00	-6,01				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMQ</i>			
<i>Não calibrado</i>	16,98	62,94	-22,37	-7,85	34,05	93,92	41,51	36,68
<i>Calibrado</i>	12,40	34,83	-1,09	-5,60	31,14	57,19	30,37	35,14
Agosto								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	131,04	80,82	54,85	-4,63	115,14	7,41	87,90	2,68
<i>Calibrado</i>	125,19	40,17	88,23	-3,21				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMQ</i>			
<i>Não calibrado</i>	15,88	73,38	-33,05	-7,31	71,60	103,41	51,56	31,44
<i>Calibrado</i>	10,04	32,75	0,33	-5,89	66,52	52,81	47,28	29,70
Setembro								
	<i>Calculado</i>				<i>Observado</i>			
	Rn	LE	H	G	Rn	LE	H	G
<i>Não calibrado</i>	141,32	92,35	55,55	-6,58	123,82	3,80	100,08	2,01
<i>Calibrado</i>	132,71	40,26	95,97	-3,51				
	<i>Erro Médio</i>				<i>DMQ</i>			
<i>Não calibrado</i>	17,50	88,56	-44,53	-8,59	70,01	122,10	63,33	29,48
<i>Calibrado</i>	8,89	36,46	-4,11	-5,52	65,01	53,32	49,08	27,61

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Neste capítulo sumarizam-se as principais conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros, de acordo com os resultados encontrados no desenvolvimento do mesmo.

5.1 Conclusões

Considerando que o modelo SSiB necessita de muitos parâmetros de entrada e que alguns deles podem apresentar incertezas quanto às suas especificações ou não ter nenhuma medida de campo associada aos mesmos, faz-se necessário que eles sejam ajustados ou calibrados, visando melhor representar as características morfológicas, fisiológicas e físicas da superfície, e conseqüentemente as trocas de energia e água entre a atmosfera e a superfície. Diversos desses parâmetros apresentam variação sazonal (fração de folha verde, índice de área foliar, comprimento de rugosidade, deslocamento do plano zero). Deste modo, tanto o estudo de sensibilidade, como o processo de calibração realizados no presente trabalho foram feitos considerando variação mensal dos parâmetros. Para isto, foram utilizadas medidas micrometeorológicas coletadas no Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-árido (CPATSA) para calibrar e validar o modelo SSiB numa versão “off-line”.

Antes de iniciar o processo de calibração, realizou-se um estudo de sensibilidade no esquema SSiB, a fim de determinar o conjunto de parâmetros da vegetação e do solo que apresenta maior sensibilidade em relação aos processos de troca entre a superfície e a atmosfera. No estudo, cada parâmetro selecionado foi sensivelmente modificado para cada integração, enquanto os demais foram mantidos constantes. Embora cada parâmetro modificado tenha causado alterações nos fluxos de superfície calculados pelo modelo SSiB, os testes mostraram que apenas alguns tiveram um impacto mais substancial. As mudanças consideradas nos parâmetros fixos e sazonais não resultaram em variações consideráveis no saldo de radiação (R_n), tanto nos meses secos (julho a setembro), como nos meses úmidos (janeiro a março). No entanto, os testes realizados

indicaram que a partição de energia em calor sensível (H) e calor latente (LE) é o processo mais sensível às mudanças nos parâmetros sazonais e fixos do modelo SSiB.

O índice de área foliar (L_c), que em outros estudos de sensibilidade para diferentes biomas foi apontado como sendo um dos primordiais, no presente estudo, quando modificado, causou alterações pouco significativas no cálculo dos fluxos de superfície. Essa pequena resposta nos fluxos de energia presumivelmente está relacionada aos baixos valores do parâmetro considerado para o bioma caatinga (menor que 1,5). Dessa forma, grandes erros no parâmetro L_c podem causar pequenos erros; porém não proporcionais na taxa de evapotranspiração, isso devido a não linearidade da relação entre L_c e a resistência no dossel (r_c). Uma outra explicação para o fato das variações consideradas em L_c e em outros parâmetros da vegetação não resultarem em variações consideráveis nos fluxos de superfície calculados pelo modelo SSiB, é que todos os testes de sensibilidade estão comprometidos com uma grande restrição que é o parâmetro fração de cobertura vegetal (V_c) ser igual a 0,10, ou seja, os parâmetros fisiológicos e morfológicos de fato não vão ter grande influência, pois o bioma é praticamente apenas solo.

O estudo de sensibilidade também mostrou que as propriedades hidráulicas do solo desempenham um papel importante na simulação dos fluxos de calor latente e de calor sensível visto que, o parâmetro B, o potencial de água no solo à saturação (ψ_s), a condutividade hidráulica à saturação (K_s) e a porosidade do solo (θ_s) foram os que conduziram a maiores variações nos fluxos turbulentos.

Portanto, com os resultados do estudo de sensibilidade foi possível explorar as funções dos parâmetros da superfície nos fluxos de energia da região semi-árida do Nordeste brasileiro. Evidenciou-se também a alta não linearidade entre os parâmetros de entrada do modelo SSiB. A redução ou o aumento nos fluxos de superfície calculados pelo modelo não se faz apenas reduzindo ou aumentando um dos parâmetros, isto é, as mudanças nos fluxos estão relacionadas à maneira como o conjunto dos parâmetros como um todo está variando. Dessa forma, em estudos posteriores de sensibilidade, faz-

se necessário considerar as diferentes interações entre os parâmetros de entrada do modelo.

No procedimento de calibração utilizaram-se sub-rotinas de minimização de mínimos quadrados da biblioteca MINPACK. Com os parâmetros não calibrados o modelo simulou bem o saldo de radiação (R_n), tanto nos meses secos como nos meses úmidos. O esquema SSiB mostrou deficiências na simulação do fluxo de LE, visto que o mesmo foi superestimado para todos os períodos da simulação, principalmente durante o dia. Essa deficiência pode estar relacionada aos parâmetros utilizados no cálculo dessa variável (os coeficientes de resistência estomática para a radiação fotossinteticamente ativa, a fração de cobertura vegetal, fração de folha verde, entre outros), os quais necessitam, portanto, de ajustes. O modelo subestimou H para todos os períodos de simulação e o fluxo de calor no solo (G) também não foi satisfatoriamente calculado pelo modelo.

O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo SSiB continuou simulando muito bem R_n , inclusive possibilitou obter melhores resultados na determinação de LE e H, e, conseqüentemente, representou melhor a partição de energia. Essa melhoria pode ser observada na diminuição dos desvios médios quadráticos e nos erros médios desses fluxos, apesar de alguns parâmetros terem-se modificado pouco na otimização. Os parâmetros sazonais foram os que menos se alteraram após o processo de otimização, ao passo que os parâmetros fixos, principalmente o potencial de água à saturação (Ψ_s), foi um dos que mais se alterou. A pequena variação nos parâmetros sazonais pode estar relacionada aos próprios parâmetros, pois possivelmente já eram representativos do bioma.

Embora o modelo tenha apresentado melhorias na simulação de LE, observou-se que o fluxo continuou sendo superestimado, sendo que a maior diferença entre os fluxos calculados e os observados foi durante o dia. Isso pode estar relacionado a possíveis limitações no algoritmo utilizado no processo de calibração e pelo fato dos dados observados estarem também sujeitos a erros significativos; logo, qualquer discussão

sobre os erros nos resultados do modelo deve levar em consideração tais erros. Outra possível razão da significativa diferença entre LE observado e calculado após a otimização pode estar relacionada à maneira como os dados observacionais de fluxos turbulentos foram obtidos. Esses dados considerados na calibração foram obtidos a partir da utilização de anemômetro sônico, através do sistema de correlação de vórtices turbulentos. Esse método não garante o fechamento do balanço de energia, podendo, assim, contribuir para possíveis discrepâncias no procedimento de calibração.

O fluxo de calor no solo (G), não apresentou variações significativas após a calibração, Isto se deve ao fato de os parâmetros calibrados estarem diretamente ligados aos cálculos de LE e H, fazendo com que os mesmos apresentem variações mais significativas.

Posteriormente ao processo de calibração foi realizada a validação dos fluxos de superfície. Com isso, pode-se mostrar ao se utilizar os parâmetros calibrados no ano de 2004 (julho a setembro) para simular os fluxos do ano seguinte (julho a setembro de 2005), que o novo conjunto de parâmetros apresentou melhoria na estimativa dos fluxos turbulentos, a qual pôde ser observada com os novos valores dos coeficientes de correlação e com as diminuições nos erros médios e nos desvios médios quadráticos (DMQ).

Em geral, conclui-se que os parâmetros, quando calibrados ou ajustados, produziram melhores resultados na determinação dos fluxos turbulentos, quando comparados com os fluxos calculados com os parâmetros iniciais, e, conseqüentemente, representaram melhor os processos de superfície. A parametrização das condições de superfície mais bem acurada permitirá melhorar a confiabilidade dos experimentos realizados utilizando-se modelos de circulação geral, bem como modelos regionais, que são fundamentais em estudos de simulação climática em regiões ameaçadas tal como a caatinga brasileira. Dessa forma, por meio dos estudos realizados neste trabalho, evidenciou-se que a consideração dos parâmetros padrões da classificação tipo 8 do

modelo SSiB, em simulações na região semi-árida do Nordeste do Brasil, podem conduzir a erros nos resultados.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Foram identificados diversos estudos complementares que poderiam ter sido realizados se não houvesse limitações de tempo e de dados. Portanto, recomenda-se que trabalhos futuros incluam:

- A utilização de outros conjuntos de dados (de superfície e de fluxos turbulentos), quando disponíveis, para estudo comparativo. Ao se utilizar os parâmetros calibrados para um único sítio para estudos de validação, podem-se introduzir erros consideráveis que podem prejudicar a qualidade dos resultados simulados.
- O estudo de sensibilidade utilizando os parâmetros calibrados e considerando as diferentes interações entre os parâmetros. Para tal, dever-se-á considerar o modelo SSiB acoplado a modelo de circulação geral ou mesmo regional.
- Avaliar a sensibilidade e calibrar outros parâmetros, como, por exemplo, a difusividade térmica do solo, o comprimento de rugosidade e o deslocamento do plano zero.
- O ajuste dos parâmetros sazonais e fixos para outros tipos de vegetação na América do Sul, para melhor representar as características da superfície continental nos modelos atmosféricos.
- Realizar o processo de calibração utilizando-se o método de múltiplos-critérios, o qual possibilita estimar parâmetros de uma maneira mais realista.

- Um estudo da interação biosfera-atmosfera no Nordeste brasileiro utilizando os novos parâmetros calibrados, visando verificar os efeitos da vegetação no clima e avaliar as conseqüências climáticas de uma possível desertificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUBINET, M.; GRELE, A.; IBROM, A.; RANNIK, S.; MONCRIEFF, J.; KOWALSKI, A.S.; MARTIN, P. H.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CLEMENT, R.; ELBERS, J.A.; GRANIER, A.; GRÜNWALD, T.; MORGENSTERN, K.; PILEGAARD, K.; REBMANN, C.; SNIJDERS, W.; VALENTINI, R.; VESA, T. Estimates of annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**. v. 30, p. 113-175, 2000.

BURKARDT, J. **Library of FORTRAN90 routines MINPACK**. Florida State University. 1998. Disponível em: < http://people.scs.fsu.edu/~burkardt/f_src/minpack/minpack.html >. Acesso em: 14 Oct. 2005.

CANDIDO, L. A. **Impacto da condição inicial de água no solo na previsão de verão da América do Sul**. 224p. (INPE-10477-TDI/931). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

CLAPP, R. B.; HORNBERGER, G. M. Empirical equations for some soil hydraulic properties. **Water Resources Research**. v. 14, p. 601-604, 1978.

CORREIA, F. W. S. **Estudo do balanço de radiação em área de policultivo na Amazônia**. 127p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2000.

CORREIA, F. W. S. **Modelagem do impacto de modificações da cobertura vegetal amazônica no clima regional**. 421p. (INPE-14094-TDI/1077). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S., MANZI, A. O.; GIELOW, R.; KUBOTA, P. Y. Calibração do simplified simple biosphere model – SSiB para áreas de pastagem e floresta na Amazônia com dados do LBA. **Acta Amazônica**. v. 35, n. 2, p.273-288, 2005.

COSTA, P. N. F. **Verificação do modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC/COLA: ciclo hidrológico e processos de superfície**. 103 p. (INPE-12273-TDI/984). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1997.

DAI, Y.; ZENG, X.; DICKINSON, R.E. **The common land model: documentation and user's guide**. 2001. 69p. Disponível em <<http://climate.eas.gatech.edu/dai/clmdoc.pdf>>. Acesso em: 14 Oct. 2005.

DEARDORFF, J.W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. **Journal of Geophysical Research**, v.83, p.1889-1903, 1978.

DELIRE, C., FOLEY, J.A. Evaluating the performance of a land surface / ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. **Journal Geophysical Research**, v. 104, n. D14, p. 16.895-16.909, 1999.

DICKINSON, R. E. **Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance**. In: Advances in geophysics. Theory of climate: proceedings of a symposium commemorating the two-hundredth anniversary of the academy of sciences of Lisbon. London, Academic Press, v. 25, p. 305-353, 1983.

DICKINSON, R.E. Modelling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. In: Hansen, E.; Takahashi, T. **Climate Processes and Climate Sensitivity**. Washington, D.C., American Geophysical Union, 1984. 368 p. ISBN-10: 0875904041.

DICKINSON, R.E.; KENNEDY, P.J.; WILSON, M.F. **Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model**. National Center for Atmospheric Research, Boulder, C.O., 1986. 69p. NCAR/TN - 275 + STR. 1986.

DICKINSON, R., HENDERSON-SELLERS, P. Modeling tropical deforestation - a study of GCM land surface parametrizations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.114, n.480, p. 439-462, 1988.

DICKINSON, R. Land-atmosphere interactions. In: Holton, J.R.; Curry, J.A.; Pyle, J.A. **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. Academic Press. 2002. v. 3. p. 1116-1136.

DOLMAN, J.; GASH, J.; ROBERTS, J.; SHUTTLEWORTH, J. Stomatal and surface conductance of tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 54, p. 303-318, 1991.

DORMAN, J. L.; SELLERS, P. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB). **Journal of Applied Meteorology**, v.28, p.833-855, 1989.

FENNESSY, M. J.; XUE, Y. Impact of USGS vegetation map on CGM simulations over the United States. **Ecological Applications**, v. 7, n. 1, p. 22-33, 1997.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, v. 60, n. 2, p. 139-147, 2001.

Hartmann, D.L. **Global physical climatology**. San Diego, California. Academic Press, 1994. 411 p. ISBN-10: 0123285305. ISBN-13: 978-0123285300.

Imbuzeiro, H. M. A. **Calibração do modelo IBIS na floresta amazônica usando múltiplos sítios**. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, 2005.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de biomas do Brasil e mapa de vegetação do Brasil** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 16 Jun. 2006.

KAHAN, D.; XUE, Y.; ALLEN, S. The impact of vegetation/soil parameters in simulations of surface energy and water balance in the semi-arid Sahel area: a case study using SEBEX and HAPEX-Sahel data. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1-2, p. 238-259, 2006.

KLINK, K. WILLMOTT, C.J. **Notes on a global vegetation data set for use in GCMs**. 1985. 110 p. Dept. of Geography, Univ. of Delaware, Newark, Delaware.

KUCHLER, A. W. World map of natural vegetation. In: McNally, R. **Goodes's world atlas**. 16 th Edition, New York, USA. 1983, p. 16-17.

MANABE, S. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. **Monthly Weather Review**, v. 97, p. 739-774, 1969.

MIHAILOVIC, D. T. Descriptions of a land-air parameterization scheme (laps). **Global and Planetary Change**. v. 13, p. 207-215, 1996.

MOORE, C. J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. **Boundary-Layer Meteorology**. v. 37, n. 1-2, p. 17-35, 1986.

MORE, J.J.; GARBOW, B. S.; HILLSTROM, K. E. **User Guide for MINPACK-1**. Argonne National Laboratory Report ANL-80-74, Argonne, Ill., 1980.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 21, n. 3b, p. 166-174, 2006.

OYAMA, M. D. **Conseqüências climáticas da mudança da vegetação no nordeste brasileiro: Um estudo de modelagem**. 2002. 220p. (INPE-9898-TDI/875). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – São José dos Campos: INPE, 2003.

ROCHA, H. R.; NOBRE, C. A.; BONATTI, J. P.; WRIGHT, I. R.; SELLERS, P. J. A vegetation atmosphere interaction study for Amazonian deforestation using field data and a 'single column' model. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 122, p. 567-594, 1996.

SELLERS, P. J.; MINTZ, Y.; SUD, Y.C.; DALCHER, A. A Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 43, p. 505-531. 1986.

SELLERS, P. J.; SHUTTLEWORTH, W. J.; DORMAN J. Calibrating the Simple Biosphere Model for Amazonian Tropical Forest using field and remote sensing data. Part I: Average calibration with field data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, p. 727-759, 1989.

SELLERS, P.J.; DICKINSON, R.E.; RANDALL, D.A.; BETTS, A.K.; HALL, F.G.; BERRY, J.A.; COLLATZ, G.J.; DENNING, A.S.; MOONEY, H.A.; NOBRE, C.A.; SATO, N.; FIELD, C.B.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water and carbon between the continents and the atmosphere, **Science**, v.275, p.502-509, 1997.

SOUZA, S. S. **Impactos climáticos regionais da mudança de vegetação no semi-árido do Nordeste brasileiro**. 209 p. (INPE-14432-TDI/1131). Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

SUN, L.; XUE, Y. Validation of SSiB model over grassland with CHeRES field experiment data in 2001. **Advances in Atmospheric Science**, v. 21, n. 4, p. 547-556. 2004.

VEENENDAAL, E. M.; KOLLE, O.; LLOYD, J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. **Global Change Biology**, v.10, p.318-328, 2004.

WILLMOTT, C. J.; KLINK, K. **A representation of the terrestrial for use in global climate studies**. Proc. International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP), Rome, Italy, European Space Agency. p. 109-112, Dec.1986.

XUE, Y.; P. J. SELLERS; J. L. KINTER; J. SHUKLA. A simplified biosphere model for global climate studies. **Journal of Climate**, v. 4, n.3, p. 345-36, 1991.

XUE, Y.; BASTABLE, H. G.; DIRMEYER, P. A.; SELLERS, P. J. Sensitivity of simulated surface fluxes to changes in land surface parameterizations— A study using ABRACOS data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, p. 386-400, 1996a.

XUE, Y.; FENESSY, M.J.; SELLERS, P.J. Impact of vegetation properties on U.S. summer weather prediction. **Journal of Geophysical Research**, v. 101 (D3), p. 7419-7430, 1996b.

XUE, Y.; ALLEN, S.J.; LI, Q. Sahel drought and land surface processes. A study using SEBEX and HAPEX-Sahel data. In: **2th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle**, p. 11-12, 1996c. Washington, GEWEX Project Office.

XUE, Y.; ZENG, F. J.; C.; SCHLOSSER, A. S. SSiB and its sensitivity to soil properties—a case study using HAPEX-Mobilhy data. **Global and Planetary Change**, v. 13, p 183-194, 1996d.

XUE, Y.; ZENG, F.J.; MITCHELL, K.E.; JANJIC, Z.; ROGERS, E. The Impact of Land Surface Processes on Simulations of the U.S. Hydrological Cycle: A Case Study of the 1993 Flood Using the SSiB Land Surface Model in the NCEP Eta Regional Model. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 2833–2860, 2001.

APÊNDICE A

Apresentam-se, abaixo, os resultados obtidos com os testes de sensibilidade para os meses de outubro a dezembro de 2004 e de abril a junho de 2005.

Nas tabelas são apresentados os valores médios mensais do saldo de radiação ($R_n - W/m^2$), do fluxo de calor latente ($LE - W/m^2$), do fluxo de calor sensível ($H - W/m^2$) e do fluxo de calor no solo ($G - W/m^2$) simulados pelo esquema SSiB para cada variação dos parâmetros sazonais e fixos. Em cada tabela, a primeira linha com valores refere-se aos valores médio mensais dos fluxos de superfície simulados considerando-se os valores padrões dos parâmetros sazonais e fixos. Os termos com % referem-se às porcentagens de mudanças ocorridas com as variações efetuadas em cada parâmetro.

Tabela A.1 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de outubro de 2004

Outubro de 2004								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	151,11		5,10		24,09		121,93	
Lc*0,5	151,01	-0,07	5,15	0,98	22,51	-6,56	123,35	1,16
Lc*2,0	151,18	0,05	5,00	-1,96	25,66	6,52	120,52	-1,16
Nc*0,01	149,59	-1,01	5,10	0,00	20,92	-13,16	123,57	1,35
Nc*1,15	151,27	0,11	5,09	-0,20	24,60	2,12	121,58	-0,29
Vc*0,5	150,51	-0,40	5,02	-1,57	21,97	-8,80	123,52	1,30
Vc*2,0	152,37	0,83	5,28	3,53	27,58	14,49	119,52	-1,98
d*0,5	152,72	1,07	4,97	-2,55	24,06	-0,12	123,70	1,45
d*2,0	150,10	-0,67	4,84	-5,10	24,01	-0,33	121,26	-0,55
Z ₀ *0,5	148,80	-1,53	5,22	2,35	24,14	0,21	119,44	-2,04
Z ₀ *2,0	151,68	0,38	5,05	-0,98	24,07	-0,08	122,57	0,52
a*0,5	151,21	0,07	5,10	0,00	24,81	2,99	121,31	-0,51
a*2,0	151,01	-0,07	5,10	0,00	23,30	-3,28	122,61	0,56
b*0,5	151,11	0,00	5,10	0,00	24,07	-0,08	121,94	0,01
b*2,0	151,12	0,01	5,10	0,00	24,12	0,12	121,91	-0,02
c*0,5	151,38	0,18	5,07	-0,59	26,04	8,09	120,27	-1,36
c*2,0	150,92	-0,13	5,11	0,20	22,66	-5,94	123,15	1,00
To*0,5	150,67	-0,29	5,12	0,39	20,87	-13,37	124,68	2,26
To*2,0	151,15	0,03	5,10	0,00	24,35	1,08	121,70	-0,19
h ₅ *0,5	151,27	0,11	5,08	-0,39	25,30	5,02	120,89	-0,85
h ₅ *2,0	150,96	-0,10	5,11	0,20	22,90	-4,94	122,95	0,84
ψ ₁ *0,5	151,11	0,00	5,10	0,00	24,09	0,00	121,93	0,00
ψ ₁ *2,0	151,11	0,00	5,10	0,00	24,09	0,00	121,93	0,00
ψ ₂ *0,5	151,11	0,00	5,10	0,00	24,09	0,00	121,93	0,00
ψ ₂ *2,0	151,11	0,00	5,10	0,00	24,09	0,00	121,93	0,00
B*0,5	156,76	3,74	4,00	-21,57	29,71	23,33	123,05	0,92
B*2,0	147,13	-2,63	5,19	1,76	14,18	-41,14	127,76	4,78
ψ _s *0,5	150,91	-0,13	4,92	-3,53	22,58	-6,27	123,41	1,21
ψ _s *2,0	153,25	1,42	5,97	17,06	34,19	41,93	113,08	-7,26
K _s *0,5	149,85	-0,83	4,79	-6,08	18,69	-22,42	126,37	3,64
K _s *2,0	154,38	2,16	5,73	12,35	39,60	64,38	109,06	-10,56
θ _s *0,5	151,55	0,29	4,85	-4,90	23,25	-3,49	123,45	1,25
θ _s *2,0	154,00	1,91	6,39	25,29	40,21	66,92	107,40	-11,92

Tabela A.2 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de novembro de 2004

Novembro de 2004								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	149,02		-1,32		47,92		102,42	
Lc*0,5	149,00	-0,01	-1,33	-0,76	46,88	-2,17	103,44	1,00
Lc*2,0	149,04	0,01	-1,33	-0,76	49,19	2,65	101,18	-1,21
Nc*0,01	147,67	-0,91	-1,34	-1,52	45,27	-5,53	103,73	1,28
Nc*1,15	149,15	0,09	-1,34	-1,32	48,35	0,90	102,13	-0,28
Vc*0,5	148,67	-0,23	-1,35	-2,27	46,81	-2,32	103,22	0,78
Vc*2,0	149,83	0,54	-1,26	4,55	49,87	4,07	101,23	-1,16
d*0,5	150,15	0,76	-1,23	6,82	47,63	-0,61	103,75	1,30
d*2,0	148,21	-0,54	-1,39	-5,30	48,10	0,38	101,50	-0,90
Z ₀ *0,5	147,00	-1,36	-1,40	-6,06	48,10	0,38	100,32	-2,05
Z ₀ *2,0	149,50	0,32	-1,31	0,76	47,88	-0,08	102,93	0,50
a*0,5	149,09	0,05	-1,32	0,00	48,47	1,15	101,94	-0,47
a*2,0	148,94	-0,05	-1,33	-0,76	47,31	-1,27	102,96	0,53
b*0,5	149,02	0,00	-1,32	0,00	47,91	-0,02	102,43	0,01
b*2,0	149,03	0,01	-1,32	0,00	47,94	0,04	102,41	-0,01
c*0,5	149,24	0,15	-1,31	0,76	49,50	3,30	101,05	-1,34
c*2,0	148,86	-0,11	-1,33	-0,76	46,78	-2,38	103,42	0,98
To*0,5	148,66	-0,24	-1,35	-2,27	45,42	-5,22	104,59	2,12
To*2,0	149,05	0,02	-1,32	0,00	48,16	0,50	102,21	-0,21
h5*0,5	149,15	0,09	-1,31	0,76	48,91	2,07	101,56	-0,84
h5*2,0	148,89	-0,09	-1,33	-0,76	46,97	-1,98	103,25	0,81
ψ ₁ *0,5	149,02	0,00	-1,32	0,00	47,92	0,00	102,42	0,00
ψ ₁ *2,0	149,02	0,00	-1,32	0,00	47,92	0,00	102,42	0,00
ψ ₂ *0,5	149,02	0,00	-1,33	-0,76	47,92	0,00	102,42	0,00
ψ ₂ *2,0	149,02	0,00	-1,33	-0,76	47,92	0,00	102,42	0,00
B*0,5	152,46	2,31	0,07	105,30	40,81	-14,84	111,59	8,95
B*2,0	146,70	-1,56	-1,95	-47,73	44,98	-6,14	103,67	1,22
ψs*0,5	148,58	-0,30	-1,01	23,48	44,99	-6,11	104,59	2,12
ψs*2,0	149,96	0,63	-1,41	-6,82	53,01	10,62	98,36	-3,96
Ks*0,5	146,03	-2,01	-0,19	85,61	32,58	-32,01	113,65	10,96
Ks*2,0	150,64	1,09	-0,71	46,21	54,68	14,11	96,67	-5,61
θs*0,5	149,06	0,03	-0,89	32,58	44,60	-6,93	105,35	2,86
θs*2,0	150,72	1,14	-1,42	-7,58	59,99	25,19	92,15	-10,03

Tabela A.3 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de dezembro de 2004

Dezembro de 2004								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	184,37		-1,39		116,57		69,20	
Lc*0,5	184,58	0,11	-1,34	3,60	116,29	-0,24	69,64	0,64
Lc*2,0	184,25	-0,07	-1,42	-2,16	117,18	0,52	68,48	-1,04
Nc*0,01	182,84	-0,83	-1,41	-1,44	113,85	-2,33	70,40	1,73
Nc*1,15	184,52	0,08	-1,39	0,00	117,00	0,37	68,91	-0,42
Vc*0,5	184,41	0,02	-1,32	5,04	116,60	0,03	69,14	-0,09
Vc*2,0	184,75	0,21	-1,46	-5,04	116,99	0,36	69,22	0,03
d*0,5	185,02	0,35	-1,29	7,19	115,87	-0,60	70,44	1,79
d*2,0	183,95	-0,23	-1,49	-7,19	117,03	0,39	68,71	-0,71
Z ₀ *0,5	182,51	-1,01	-1,59	-14,39	117,32	0,64	66,79	-3,48
Z ₀ *2,0	184,65	0,15	-1,35	2,88	116,33	-0,21	69,66	0,66
a*0,5	183,76	-0,33	-1,46	-5,04	116,74	0,15	68,48	-1,04
a*2,0	184,31	-0,03	-1,39	0,00	116,04	-0,45	69,66	0,66
b*0,5	184,37	0,00	-1,39	0,00	116,56	-0,01	69,20	0,00
b*2,0	184,38	0,01	-1,39	0,00	116,58	0,01	69,19	-0,01
c*0,5	184,58	0,11	-1,40	-0,72	117,98	1,21	68,00	-1,73
c*2,0	184,24	-0,07	-1,38	0,72	115,56	-0,87	70,06	1,24
To*0,5	184,07	-0,16	-1,38	0,72	114,37	-1,89	71,08	2,72
To*2,0	184,40	0,02	-1,39	0,00	116,75	0,15	69,03	-0,25
h5*0,5	184,48	0,06	-1,39	0,00	117,38	0,69	68,49	-1,03
h5*2,0	184,27	-0,05	-1,39	0,00	115,76	-0,69	69,90	1,01
ψ ₁ *0,5	184,37	0,00	-1,39	0,00	116,57	0,00	69,20	0,00
ψ ₁ *2,0	184,37	0,00	-1,39	0,00	116,57	0,00	69,20	0,00
ψ ₂ *0,5	184,37	0,00	-1,39	0,00	116,57	0,00	69,20	0,00
ψ ₂ *2,0	184,37	0,00	-1,39	0,00	116,57	0,00	69,20	0,00
B*0,5	177,97	-3,47	0,93	166,91	78,06	-33,04	98,98	43,03
B*2,0	173,05	-6,14	2,04	246,76	59,28	-49,15	111,73	61,46
ψs*0,5	180,34	-2,19	0,14	110,07	93,76	-19,57	86,44	24,91
ψs*2,0	186,68	1,25	-2,64	-89,93	129,16	10,80	60,16	-13,06
Ks*0,5	167,10	-9,37	2,30	265,47	22,49	-80,71	142,31	105,65
Ks*2,0	184,85	0,26	-1,39	0,00	118,46	1,62	67,77	-2,07
θs*0,5	177,87	-3,53	0,64	146,04	77,98	-33,10	99,26	43,44
θs*2,0	180,90	-1,88	1,38	199,28	96,16	-17,51	83,36	20,46

Tabela A.4 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de abril de 2005

Abril de 2005								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	140,84		-0,73		86,09		55,48	
Lc*0,5	140,79	-0,04	-0,74	-1,37	85,41	-0,79	56,11	1,14
Lc*2,0	140,98	0,10	-0,70	4,11	87,41	1,53	54,26	-2,20
Nc*0,01	139,01	-1,30	-0,73	0,00	83,45	-3,07	56,29	1,46
Nc*1,15	141,01	0,12	-0,73	0,00	86,44	0,41	55,30	-0,32
Vc*0,5	140,77	-0,05	-0,73	0,00	86,98	1,03	54,53	-1,71
Vc*2,0	141,38	0,38	-0,70	4,11	85,47	-0,72	56,61	2,04
d*0,5	141,31	0,33	-0,67	8,22	85,17	-1,07	56,82	2,42
d*2,0	139,75	-0,77	-0,69	5,48	87,37	1,49	53,07	-4,34
Z ₀ *0,5	139,69	-0,82	-0,79	-8,22	87,08	1,15	53,39	-3,77
Z ₀ *2,0	141,10	0,18	-0,71	2,74	86,95	1,00	55,86	0,68
a*0,5	140,94	0,07	-0,72	1,37	86,80	0,82	54,86	-1,12
a*2,0	140,76	-0,06	-0,73	0,00	85,48	-0,71	56,01	0,96
b*0,5	140,83	-0,01	-0,73	0,00	86,03	-0,07	55,53	0,09
b*2,0	140,87	0,02	-0,73	0,00	86,20	0,13	55,39	-0,16
c*0,5	140,96	0,09	-0,72	1,37	86,89	0,93	54,80	-1,23
c*2,0	140,74	-0,07	-0,73	0,00	85,43	-0,77	56,05	1,03
To*0,5	140,55	-0,21	-0,74	-1,37	84,16	-2,24	57,13	2,97
To*2,0	140,87	0,02	-0,73	0,00	86,32	0,27	55,28	-0,36
h5*0,5	140,91	0,05	-0,73	0,00	86,57	0,56	55,07	-0,74
h5*2,0	140,76	-0,06	-0,73	0,00	85,54	-0,64	55,96	0,87
ψ ₁ *0,5	140,84	0,00	-0,73	0,00	86,09	0,00	55,48	0,00
ψ ₁ *2,0	140,84	0,00	-0,73	0,00	86,09	0,00	55,48	0,00
ψ ₂ *0,5	140,84	0,00	-0,73	0,00	86,09	0,00	55,48	0,00
ψ ₂ *2,0	140,84	0,00	-0,73	0,00	86,09	0,00	55,48	0,00
B*0,5	136,46	-3,11	-0,37	49,32	61,01	-29,13	75,82	36,66
B*2,0	145,42	3,25	-1,06	-45,21	110,94	28,87	35,55	-35,92
ψ _s *0,5	139,65	-0,84	-0,39	46,58	79,29	-7,90	60,75	9,50
ψ _s *2,0	142,23	0,99	-0,97	-32,88	93,56	8,68	49,63	-10,54
K _s *0,5	140,97	0,09	-0,58	20,55	86,75	0,77	54,80	-1,23
K _s *2,0	140,75	-0,06	-0,86	-17,81	85,61	-0,56	56,00	0,94
θ _s *0,5	139,83	-0,72	-0,67	8,22	78,64	-8,65	61,86	11,50
θ _s *2,0	140,88	0,03	-0,82	-12,33	91,00	5,70	50,70	-8,62

Tabela A.5 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de maio de 2005

Maio de 2005								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	106,52		-1,40		66,39		41,52	
Lc*0,5	106,51	-0,01	-1,38	1,43	66,08	-0,47	41,82	0,72
Lc*2,0	106,58	0,06	-1,37	2,14	66,87	0,72	41,08	-1,06
Nc*0,01	105,04	-1,39	-1,40	0,00	64,21	-3,28	42,23	1,71
Nc*1,15	106,64	0,11	-1,40	0,00	66,68	0,44	41,36	-0,39
Vc*0,5	106,41	-0,10	-1,41	-0,71	66,73	0,51	41,09	-1,04
Vc*2,0	106,98	0,43	-1,33	5,00	66,54	0,23	41,77	0,60
d*0,5	106,90	0,36	-1,39	0,71	65,83	-0,84	42,46	2,26
d*2,0	105,69	-0,78	-1,40	0,00	67,35	1,45	39,73	-4,31
Z ₀ *0,5	105,71	-0,76	-1,46	-4,29	66,96	0,86	40,20	-3,18
Z ₀ *2,0	106,69	0,16	-1,38	1,43	66,30	-0,14	41,77	0,60
a*0,5	106,60	0,08	-1,40	0,00	67,01	0,93	40,99	-1,28
a*2,0	106,45	-0,07	-1,40	0,00	65,85	-0,81	41,99	1,13
b*0,5	106,51	-0,01	-1,40	0,00	66,36	-0,05	41,55	0,07
b*2,0	106,53	0,01	-1,39	0,71	66,46	0,11	41,47	-0,12
c*0,5	106,62	0,09	-1,40	0,00	67,05	0,99	40,97	-1,32
c*2,0	106,44	-0,08	-1,39	0,71	65,82	-0,86	42,01	1,18
To*0,5	106,27	-0,23	-1,39	0,71	64,73	-2,50	42,94	3,42
To*2,0	106,56	0,04	-1,40	0,00	66,69	0,45	41,27	-0,60
h5*0,5	106,57	0,05	-1,40	0,00	66,76	0,56	41,21	-0,75
h5*2,0	106,46	-0,06	-1,40	0,00	65,95	-0,66	41,90	0,92
ψ ₁ *0,5	106,52	0,00	-1,40	0,00	66,39	0,00	41,52	0,00
ψ ₁ *2,0	106,52	0,00	-1,40	0,00	66,39	0,00	41,52	0,00
ψ ₂ *0,5	106,52	0,00	-1,40	0,00	66,39	0,00	41,52	0,00
ψ ₂ *2,0	106,52	0,00	-1,40	0,00	66,39	0,00	41,52	0,00
B*0,5	102,63	-3,65	-1,22	12,86	45,08	-32,10	58,78	41,57
B*2,0	110,57	3,80	-1,79	-27,86	87,96	32,49	24,40	-41,23
ψ _s *0,5	105,43	-1,02	-1,21	13,57	60,37	-9,07	46,27	11,44
ψ _s *2,0	107,73	1,14	-1,73	-23,57	72,91	9,82	36,55	-11,97
K _s *0,5	106,26	-0,24	-1,16	17,14	64,77	-2,44	42,65	2,72
K _s *2,0	106,60	0,08	-1,59	-13,57	66,95	0,84	41,25	-0,65
θ _s *0,5	105,77	-0,70	-0,35	75,00	61,04	-8,06	46,08	10,98
θ _s *2,0	106,40	-0,11	-1,77	-26,43	69,37	4,49	38,49	-7,30

Tabela A.6 – Resumo dos testes de sensibilidade para o mês de junho de 2005

Junho de 2005								
	Rn		G		LE		H	
	Rn	%Rn	G	%G	LE	%LE	H	%H
	115,81		-0,95		73,03		43,73	
Lc*0,5	116,42	0,53	-0,97	-2,11	71,25	-2,44	46,15	5,53
Lc*2,0	116,56	0,65	-1,01	-6,32	72,40	-0,86	45,17	3,29
Nc*0,01	114,75	-0,92	-1,01	-6,32	68,88	-5,68	46,88	7,20
Nc*1,15	116,58	0,66	-1,00	-5,26	72,16	-1,19	45,43	3,89
Vc*0,5	116,30	0,42	-0,99	-4,21	71,52	-2,07	45,77	4,66
Vc*2,0	117,02	1,04	-0,99	-4,21	72,99	-0,05	45,02	2,95
d*0,5	116,79	0,85	-0,97	-2,11	71,02	-2,75	46,74	6,88
d*2,0	115,69	-0,10	-1,01	-6,32	73,03	0,00	43,67	-0,14
Z ₀ *0,5	115,69	-0,10	-0,99	-4,21	72,21	-1,12	44,47	1,69
Z ₀ *2,0	116,65	0,73	-1,01	-6,32	71,76	-1,74	45,90	4,96
a*0,5	116,58	0,66	-1,00	-5,26	72,54	-0,67	45,04	3,00
a*2,0	116,39	0,50	-1,00	-5,26	71,08	-2,67	46,31	5,90
b*0,5	116,48	0,58	-1,00	-5,26	71,75	-1,75	45,73	4,57
b*2,0	116,49	0,59	-1,00	-5,26	71,83	-1,64	45,66	4,41
c*0,5	116,62	0,70	-1,01	-6,32	72,75	-0,38	44,88	2,63
c*2,0	116,37	0,48	-1,00	-5,26	70,97	-2,82	46,41	6,13
To*0,5	116,16	0,30	-1,00	-5,26	69,48	-4,86	47,68	9,03
To*2,0	116,53	0,62	-1,01	-6,32	72,19	-1,15	45,35	3,70
h5*0,5	116,55	0,64	-1,00	-5,26	72,32	-0,97	45,24	3,45
h5*2,0	116,40	0,51	-1,00	-5,26	71,15	-2,57	46,25	5,76
ψ ₁ *0,5	116,48	0,58	-1,00	-5,26	71,78	-1,71	45,71	4,53
ψ ₁ *2,0	116,48	0,58	-1,00	-5,26	71,78	-1,71	45,71	4,53
ψ ₂ *0,5	116,48	0,58	-1,00	-5,26	71,78	-1,71	45,71	4,53
ψ ₂ *2,0	116,48	0,58	-1,00	-5,26	71,78	-1,71	45,71	4,53
B*0,5	112,91	-2,50	-0,98	-3,16	51,18	-29,92	62,72	43,43
B*2,0	120,04	3,65	-1,19	-25,26	91,90	25,84	29,33	-32,93
ψ _s *0,5	115,37	-0,38	-0,92	3,16	65,52	-10,28	50,78	16,12
ψ _s *2,0	117,76	1,68	-1,22	-28,42	79,03	8,22	39,95	-8,64
K _s *0,5	116,04	0,20	-0,95	0,00	69,26	-5,16	47,74	9,17
K _s *2,0	116,66	0,73	-1,06	-11,58	72,77	-0,36	44,95	2,79
θ _s *0,5	114,68	-0,98	-1,07	-12,63	60,37	-17,34	55,38	26,64
θ _s *2,0	116,65	0,73	-1,27	-33,68	76,80	5,16	41,12	-5,97

