HEMLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO

CALIBRAÇÃO DO MODELO IBIS NA FLORESTA AMAZÔNICA USANDO MÚLTIPLOS SÍTIOS

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2005

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e Classificação da Biblioteca Central da UFV

T
I32c
2005

Imbuzeiro, Hemlley Maria Acioli, 1980-
Calibração do modelo IBIS na Floresta Amazônica usando múltiplos sítios. / Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro. – Viçosa: UFV, 2005.
xxv, 67f : il. ; 29cm.

Orientador: Marcos Heil Costa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referência bibliográfica: f. 63-67.

1. Meteorologia agrícola. 2. Calibração. 3. Florestas tropicais - Amazônia. 4. Reservas da biosfera. I.Universidade Federal de Viçosa. II.Título.
CDD 22.ed. 630.2515

HEMLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO

CALIBRAÇÃO DO MODELO IBIS NA FLORESTA AMAZÔNICA USANDO MÚLTIPLOS SÍTIOS

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

APROVADA: 12 de julho de 2005

Prof. Gilberto Chohaku Sediyama
(Conselheiro)

Prof. Aristides Ribeiro
(Conselheiro)

Prof. Humberto Ribeiro da Rocha

Dr. Antônio Ocimar Manzi

Prof. Marcos Heil Costa
(Orientador)

Aos meus pais, **JOSÉ NEWTON MOTENEGRO IMBUZEIRO** e **RILEY ACIOLI RIBEIRO**, minha avó **BENEDITA ACIOLI RIBEIRO (***in memoriam***),** minhas irmãs **NEWLEY** e **DANYWBIA** e irmão **SAULO** e a minha madrinha **MARIA ALICE DA SILVA**, que tanto contribuíram e incentivaram para que eu alcançasse todos os objetivos durante minha vida.

FRASES

"Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância".

(John Kennedy)

"Duvidemos até mesmo da própria dúvida".

(Anatole France)

"Tentar e falhar é, pelo menos, aprender. Não chegar a tentar é sofrer a inestimável perda do que poderia ter sido".

(Geraldo Eustáquio)

"A verdadeira maneira de se enganar é julgasse mais sábio que os outros".

(La Rochefoucauld)

"Só me interessam os passos que tive de dar na vida para chegar a mim mesmo".

(Herman Hesse)

"Cada pessoa que passa em nossa vida, passa sozinha, é porque cada pessoa é única e nenhuma substitui a outra. Cada pessoa que passa em nossa vida passa sozinha, e não nos deixa só, porque deixa um pouco de si e leva um pouquinho de nós. Essa é a mais bela responsabilidade da vida e a prova de que as pessoas não se encontram por acaso".

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

- Primeiro lugar a DEUS, que me deu vida, fé, saúde, inteligência, capacidade de sonhar e lutar para conquistar meus objetivos e pela presença em todos os momentos.
- À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade de realizar o curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola.
- À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo.
- Ao projeto LBA, pelo fornecimento dos dados de fluxos e meteorológicos nos sítios experimentais da Amazônia.
- Aos meus pais José Newton Montenegro Imbuzeiro e Riley Acioli Ribeiro, pela educação nos princípios da verdade, pelos valiosos incentivos e inspirações necessárias para vencer as dificuldades e barreiras na realização da conquista de meus ideais, por tudo.
- Aos meus irmãos Newley, Saulo e Danywbia, a minha avó Benedita Acioli (*in memoriam*), a minha madrinha Maria Alice e ao meu cunhado Fabrizzio Tenório pelo apoio, pelo amor e grande força na continuidade da minha vida profissional.
- Ao grande amigo, Professor Marcos Heil, meu orientador, pela paciência, o apoio, a dedicação, a amizade e o brilhantismo na maneira de me orientar para esta tese. Pela sua dedicação a ciência, que me fez admirar e gostar cada vez mais da Meteorologia.
- Aos meus co-orientadores, Professor Aristides Ribeiro e Gilberto C. Sediyama, pela atenção, pela amizade, pelas sugestões e contribuições.
- Ao Dr. Antônio Ocimar Manzi, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) pelas valiosas sugestões e em especial ao Professor Humberto Rocha, da Universidade

de São Paulo (USP) pela amizade, pelas sugestões e esclarecimento de dúvidas ao longo deste trabalho.

- Aos meus amigos e eternos professores, Marco Antônio Maringolo Lemes e Luis Carlos Baldicero Molion, da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) pelos conselhos, incentivos e a nossa grande amizade.
- Aos demais professores que contribuíram para o enriquecimento do meu intelecto.
- A todos os amigos e funcionários da Meteorologia Agrícola pela amizade e convívio com que me acolheram. Em especial aos amigos José Luiz, Raniéri, Danilo, Mula, Evaldo, Givanildo, Vanda, Hernani, Leonardo e Evandro.
- Aos amigos do Grupo de Pesquisa do prof. Marcos Heil, Sílvia Yanagi (pelo carinho, amizade e sugestões), Marcos Paulo, Cristiane, Lúcia, Edson, Mônica, Márcia, Gleidson (pela paciência, disposição e boa vontade no ensinamento de noções básicas de programação), Varejão e Cleverson, pelo coleguismo.
- Aos amigos Gustavo e Guilherme Lyra, e Taciana Toledo, que sempre me deram força para todas as questões da minha vida.
- A Leonardo Moreira, pelo carinho, pela dedicação, pelos incentivos, pelas palavras acolhedoras, pelos momentos de descontração e risos e pela amizade.
- As minhas grandes amigas e primas, Lisiane, Mônica, Scheila, Vânia e Lívia, pela confiança na minha vitória. A minha tia Vânuzia, que contribuiu com seu carinho, palavras e orações para que tudo desse certo e as minhas tias Paulina e Rísia, e ao tio Léo, pela torcida e apoio.
- A Solange, Kepler, Patrícia, Augusto e Kepinha, pela amizade, carinho, atenção, acolhimento e aconchego de um lar.
- A Luiz Carlos Pequini Filho, pelo companheirismo, carinho, atenção, serenidade e, acima de tudo pela segurança e cumplicidade.
- Ás amizades feitas em Minas Gerais, Claudinha Cotta, Denise Maria, Leonardo Piccolo (100 noção), Taty Show, Cíntia, Leonardo Tropia e Rodolfo (malukinho), pelo coleguismo e grandes momentos de descontração e risos.
- A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

BIOGRAFIA

HEMLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO, filha de José Newton Montenegro Imbuzeiro e Riley Acioli Ribeiro, nasceu em 23 de setembro de 1980, na cidade de Maceió-AL.

Em dezembro de 1998 terminou o 2° grau no Colégio Santíssimo Sacramento.

Iniciou a graduação em Meteorologia em março de 1999, obtendo o título de Bacharel em Meteorologia, pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), em fevereiro de 2003. Nesse período foi aluna de iniciação científica e bolsista da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) de março de 2000 a janeiro de 2003.

Em março de 2003 iniciou o curso de pós-graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), dedicando-se ao estudo de Micrometeorologia de Floresta.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS..... ix

LISTA DE TABELAS..... xiii

LISTA DE SÍMBOLOS..... xv

LISTA DE ABREVIATURAS..... xx

RESUMO..... xxi

ABSTRACT..... xxiii

1. INTRODUÇÃO 1

2. METODOLOGIA 4

2.1. Descrição dos sítios experimentais..... 4

2.2. Dados..... 5

2.2.1. Descrição dos dados..... 5

2.2.2. Análise de erros e filtragem de valores espúrios..... 7

2.2.3. Preenchimento de falhas dos dados de entrada..... 8

2.2.4. Filtragem dos dados de validação do modelo..... 8

2.3. Descrição do IBIS..... 10

2.3.1. Fisiologia vegetal e condutância estomática..... 11

2.3.2. Troca líquida de CO_2 do ecossistema..... 12

2.3.3. Distribuição de raízes..... 13

2.3.4. Fluxo de calor sensível e latente..... 14

2.4. Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo..... 15

2.5. Calibração do modelo em sítios individuais..... 15

2.6. Teste da calibração em outros sítios..... 17

3. RESULTADO E DISCUSSÃO..... 22

3.1.Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo..... 22

3.2. Calibração individual..... 24

3.2.1. Flona do Tapajós (km 83)..... 25

3.2.2. Flona do Tapajós (km 67)..... 26

3.2.3. Reserva do Cuieiras (km 34)..... 27

3.2.4. Reserva Biológica do Jaru..... 28

3.2.5. Discussão conjunta..... 29

3.3. Teste da calibração em outros sítios..... 30

4. RESUMO E CONCLUSÕES..... 58

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa com a localização dos sítios micrometeorológicos utilizados neste trabalho..... 19

Figura 2 - Disponibilidade dos dados (traço negro) e as falhas (em branco) para os cinco sítios experimentais, durante o período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2003. A porcentagem de falhas no período de disponibilidade também é indicada..... 19

Figura 3 - Esquema com as características dos processos do modelo de ecossistema terrestre IBIS..... 21

Figura 4 - Variação da fração acumulada de raízes finas (Y) com a profundidade do solo (cm), para diversos valores de β_2..... 21

Figura 5 - RMSE para o fluxo de calor sensível ($RMSE_H$), fluxo de calor latente ($RMSE_{LE}$) e valor médio ($RMSE_{H\text{-}LE}$) em função do parâmetro m, para Flona do Tapajós km 67. $V_{máx}$ em μmol m^{-2} s^{-1}, C_{HS} em 10^5 J m^{-2} °C^{-1}.... 40

Figura 6 - Igual à Figura 4, mas em função de $V_{máx}$..... 41

Figura 7 - Igual à Figura 4, mas em função de β_2..... 42

Figura 8 - Igual à Figura 4, mas em função de C_{HS}..... 43

Figura 9 - Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE), mostrando ainda a reta 1:1 e a reta de regressão, com seus coeficientes, para Tapajós km 83..... 44

Figura 10 - Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE para Tapajós km 83..... 45

Figura 11 - Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de agosto e novembro de 2000 e março e maio de 2001, para o sítio de Tapajós km 83. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados..... 45

Figura 12 - Igual à Figura 11, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol $m^{-2}s^{-1}$)..... 46

Figura 13 - Igual à Figura 11, para radiação fotossinteticamente ativa refletida (μmol m^{-2} s^{-1})..... 46

Figura 14 - Igual à Figura 11, mas para fluxo de calor no solo (W m^{-2})..... 46

Figura 15 - Igual à Figura 11, mas para fluxo de calor sensível (W m^{-2})..... 47

Figura 16 - Igual à Figura 11, mas para fluxo de calor latente (W m^{-2})..... 47

Figura 17 - Igual à Figura 11, mas para troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1}) 47

Figura 18 - Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE), mostrando ainda a reta 1:1 e a reta de regressão, com seus coeficientes, para Tapajós km 67..... 48

Figura 19 - Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE, para Tapajós km 67..... 48

Figura 20 - Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de abril e julho de 2001 e fevereiro e julho de 2002, para o sítio de Tapajós km 67. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados..... 49

Figura 21 - Igual à Figura 20, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol m^{-2} s^{-1}).....…….....….. 49

Figura 22 - Igual à Figura 20, para radiação fotossinteticamente ativa refletida (μmol m^{-2} s^{-1}).....…….....…….... 50

Figura 23 - Igual à Figura 20, mas para fluxo de calor sensível (W m^{-2})..... 50

Figura 24 - Igual à Figura 20, mas para fluxo de calor latente (W m^{-2})..... 51

Figura 25 - Igual à Figura 20, mas para a troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1})..... 51

Figura 26 - Gráficos de Dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE) para a Reserva do Cuieiras..... 52

Figura 27 - Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE, para Cuieiras..... 52

Figura 28 - Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de setembro e dezembro de 1999 e junho e julho de 2000, para o sítio do Cuieiras. Períodos em branco representam períodos em que os dados foram filtrados..... 53

Figura 29 - Igual à Figura 28, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol m^{-2} s^{-1})…… 53

Figura 30 - Igual à Figura 28, mas radiação fotossinteticamente ativa refletida (μmol m^{-2} s^{-1}).....…….....….. 53

Figura 31 - Igual à Figura 28, mas para fluxo de calor sensível (W m^{-2})..... 54

Figura 32 - Igual à Figura 28, mas para fluxo de calor latente (W m^{-2})..... 54

Figura 33 - Igual à Figura 28, mas para a troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1})..... 54

Figura 34 - Gráficos de Dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE), para a Rebio Jaru..... 55

Figura 35 - Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE, para Rebio Jaru..... 55

Figura 36 - Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de abril, junho, outubro e novembro de 1999, para Rebio Jaru. Períodos em branco representam períodos em que os dados foram filtrados..... 56

Figura 37 - Igual à Figura 36, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol m^{-2} s^{-1})..... 56

Figura 38 - Igual à Figura 36, mas para o fluxo de calor sensível (W m^{-2})..... 56

Figura 39 - Igual à Figura 36, mas para o fluxo de calor latente (W m^{-2})..... 57

Figura 40 - Igual à Figura 36, mas para o fluxo de CO_2 e a troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1})..... 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem dos dados de H e LE quando $u^* > u^*_0$ em função de u^*_0 (u^*_0 em $m.s^{-1}$)..... 20

Tabela 2 - Tabela 2- Porcentagem dos dados aproveitáveis de H e LE em função de δ..... 20

Tabela 3 - Porcentagem dos dados aproveitáveis de H e LE para condições em que não foi utilizada filtragem e em função do flag, δ, u^*_0, utilizando os três critérios..... 20

Tabela 4 - Parâmetros não calibrados (Inicial) e parâmetros calibrados para cada sítio..... 34

Tabela 5 - Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio da Flona do Tapajós km 83. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais..... 34

Tabela 6- Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio da

Flona do Tapajós km 67. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais..... 35

Tabela 7 - Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio do Cuieiras km 34. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais..... 36

Tabela 8 - Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio da Rebio Jaru. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais..... 37

Tabela 9 - Coeficientes de correlação (ρ), inclinação (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as melhores calibrações individuais repetidas para o sítio da Flona do Tapajós km 83..... 38

Tabela 10 - Igual à Tabela 9, só que para o sítio da Flona do Tapajós km 67..... 38

Tabela 11 - Igual à Tabela 9, só que para o sítio da Reserva do Cuieiras..... 39

Tabela 12 - Igual à Tabela 9, só que para Rebio Jaru..... 39

LISTA DE SÍMBOLOS

A_g	Assimilação de CO_2 bruta
A_n	Assimilação de CO_2 líquida
$APAR$	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
b	Intercepto da relação linear
c_i	Concentração interna de CO_2
C_{HS}	Capacidade térmica dos galhos por unidade de área no dossel superior
C_{HU}	Capacidade térmica das folhas por unidade de área no dossel superior
C_{HL}	Capacidade térmica das folhas e galhos por unidade de área no dossel inferior
c_s	Concentração de CO_2 na camada limite foliar
d	Profundidade do solo (cm)
$d_{máx}$	Profundidade máxima do solo (cm)
f	Número de pontos de falhas

F_C	Fluxo de CO_2
Flag	Critério de filtragem de dados faltantes
G	Fluxo de calor no solo
GPP	Produtividade Primária Total
g_s	Condutância estomática
H	Fluxo de calor sensível
h_a	Umidade relativa do ar
i	Células que serão interpoladas
J_c	Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela Rubisco
J_e	Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz
K_c e K_o	Coeficientes de Michaelis-Menten para CO_2 e O_2
LAI	Índice de área foliar
LE	Fluxo de calor latente
L_{in}	Radiação de onda longa incidente
m	Parte inteira de (*f*/24 +1)
m	Coeficiente relacionado à condutância estomática

NEE	Troca líquida de CO_2 do ecossistema
NPP	Produção primária líquida do ecossistema
p	Célula que precede a falha
P	Precipitação
PAR_{in}	Radiação fotossinteticamente ativa incidente
PAR_{out}	Radiação fotossinteticamente ativa refletida
q_a	Umidade especifica do ar
R	Fluxo residual associado com o erro
R_A	Respiração autotrófica do ecossistema
R_d	Respiração de manutenção
Rebio	Reserva Biológica do Jaru
RMSE	Raiz do erro quadrado médio
$RMSE_H$	Valores de RMSE do fluxo de calor sensível
$RMSE_{LE}$	Valores de RMSE do fluxo de calor latente
$RMSE_{H-LE}$	Valor médio entre $RMSE_H$ e $RMSE_{LE}$
R_n	Saldo de radiação

S	Taxa de variação da energia armazenada no dossel
S	Simulação
S_{in}	Radiação solar incidente
Skm83-Pkm83	Calibração do sítio Tapajós km 83 usada no próprio sítio
Skm83-Pkm67	Melhores parâmetros da calibração do sítio Tapajós km 67 usada no sítio base Tapajós km 83
Skm83-Pkm34	Melhores parâmetros da calibração do sítio do Cuieiras usada no sítio base Tapajós km 83
Skm83-PJaru	Melhores parâmetros da calibração da Rebio Jaru usada no sítio base Tapajós km 83
T	Temperatura da folha
T_a	Temperatura do ar
u_a	Velocidade horizontal do vento
u^*	Velocidade de fricção do vento
u^*_0	Critério da turbulência mínima
$V_{máx}$	Capacidade máxima da enzima Rubisco à 15°C
X_i	Valor a ser preenchido
X_p	Antecessor da falha
X_{p+f+1}	Sucessor da falha

Y	Fração de raízes finas entre a superfície e profundidade do solo d
w_{soi}	Umidade inicial do solo
α	Coeficiente de inclinação da reta de regressão linear
α_3	Eficiência quântica da planta C_3
β_2	Distribuição de raízes finas
Γ_*	Ponto de compensação para a assimilação de CO_2 bruta
δ	Critério do fechamento do balanço de radiação
ε	Erro relativo médio
λ	Emissividade
ζ	Custo de respiração da atividade da Rubisco
ρ	Coeficiente de correlação
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$\omega(T)$	Função de estresse devido à temperatura
$\omega(S)$	Função de estresse devido à umidade do solo

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRACOS – Estudo Observacional do Clima na Amazônia Anglo-Brasileiro

BATS – Modelo de Transferência Biosfera-Atmosfera

CLM – Community Land Model

GCMs – Modelos de Circulação Geral da Atmosfera

IBIS – Modelo Integrado da Biosfera

LBA – Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia

LSM – Modelo de Superfície da Terra

LSX – Modelo de Superfície da Terra

SiB – Modelo Simplificado da Biosfera

RESUMO

IMBUZEIRO, Hemlley Maria Acioli, M. S., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2005. **Calibração do modelo IBIS na floresta Amazônica usando múltiplos sítios.** Orientador: Marcos Heil Costa. Conselheiros: Aristides Ribeiro e Gilberto Chohaku Sediyama.

Considerando que modelos que simulam fluxos entre a biosfera e a atmosfera utilizam muitos parâmetros e que alguns destes podem apresentar incertezas quanto às suas especificações ou não ter nenhuma medida de campo associada aos mesmos, faz-se necessário ajustar ou calibrar estes parâmetros, visando melhor representar as características biofísicas do ecossistema. Tradicionalmente, essa calibração é feita contra dados de um único sítio micrometeorológico. Neste trabalho utilizaram-se medidas micrometeorológicas coletadas nos sítios experimentais do projeto LBA para calibrar o modelo IBIS, a fim de determinar se a calibração obtida usando dados de um único sítio é representativa para todo um ecossistema. Os sítios usados foram Flona do Tapajós (km 83 e km 67), Reserva do Cuieiras (km34) e Rebio Jaru. O procedimento de calibração envolveu aproximadamente 95 simulações para cada um dos quatro sítios. Para cada sítio foi obtido um conjunto de parâmetros, β_2 (distribuição de raízes finas), $V_{máx}$ (capacidade máxima da enzima Rubisco), m (coeficiente relacionado à condutância estomatal) e C_{HS} (capacidade térmica dos galhos), que otimizava as estatísticas dos coeficientes de correlação (ρ) e de inclinação da reta de regressão entre os dados simulados e observados (α), e a minimização do erro relativo médio (ε) e da raiz do erro quadrado médio (RMSE). Antes de iniciar o processo de calibração propriamente dito foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados simulados pelo modelo a diversos parâmetros de entrada. Esta análise foi feita, apenas, para o sítio Flona do Tapajós km 67, onde foi observado que o RMSE mínimo foi atingido com o conjunto de parâmetros β_2 = 0,98, $V_{máx}$ = 65 μmol m^{-2} s^{-1}, m = 9 e C_{HS} = 2,1.10^5 J m^{-2} °C^{-1}. Após a calibração individual para cada sítio, de maneira geral, os resultados simulados pelo modelo se ajustaram bem aos dados observados em todos os sítios, representando bem a variabilidade horária do saldo de

radiação (R_n), da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}), do fluxo de calor sensível (H) e latente (LE), e da troca líquida de CO_2 do ecossistema (NEE) ou fluxo de CO_2 (F_C), exceto no caso de NEE para a Reserva do Cuieiras e, em alguns casos, de valores extremos de H e LE. A estimativa do fluxo de calor no solo (G), entretanto não melhorou com a calibração. A calibração mais satisfatória foi atingida no sítio da Flona do Tapajós km 67. Já o teste que utiliza melhores parâmetros obtidos em cada sítio nos outros sítios forneceu uma resposta inicial sobre a representatividade da calibração feita utilizando dados de apenas um sítio para todo um vasto ecossistema. Nesta análise percebeu-se que, ao se utilizar os parâmetros calibrados para um único sítio em todos os demais, introduz-se erros consideráveis que podem prejudicar a qualidade dos resultados simulados. Logo, concluiu-se que os dados coletados em um único sítio não são representativos para todo um ecossistema, mesmo que contíguo. A conclusão obtida no presente trabalho e as dificuldades encontradas durante sua execução têm importantes ramificações. Em primeiro lugar, é real a necessidade de adicionar outros parâmetros espacialmente explícitos aos modelos que simulam fluxos superficiais; em segundo lugar, a concepção e operação de redes de medições de fluxos, como o LBA e a FLUXNET, devem ser revistas, padronizando metodologias de modo a evitar diferenças sistemáticas entre os diferentes sítios.

ABSTRACT

IMBUZEIRO, Hemlley Maria Acioli, M. S., Universidade Federal de Viçosa, July 2005. **Calibration of the model IBIS in the Amazonian forest using multiple sites.** Adviser: Marcos Heil Costa. Committee members: Aristides Ribeiro and Gilberto Chohaku Sediyama.

Considering that models simulating the fluxes between the biosphere and the atmosphere use several parameters, and that many of them may show uncertainties related either to their specifications or to the absence of field measurements associated to them, there is a need for calibrating these parameters to attain a better representation of the ecosystem's biophysical characteristics. This calibration is traditionally performed by using the data of a single micrometeorological site. This work, micrometeorological measurements collected in four experimental sites of the LBA project to calibrate the IBIS model, in order to determine whether the calibration based on data relative to a single site would be representative of a whole ecosystem. The sites Flona do Tapajós km 83 and km 67, Reserva do Cuieiras (km34) and Rebio Jaru were used. The calibration procedure involved around 95 simulations, for each one of the four sites. For each site, a set of optimum parameters were obtained: β_2 (fine root distributions), V_{max} (maximum capacity of the Rubisco enzyme), m (coefficient related to the stomatal conductance) and C_{HS} (heat capacity of stems), that optimized the statistics of the correlation coefficient (ρ) and the slope of the linear regression line between the simulated and observed data (α), and the minimization of both the mean relative error (ε) and the root mean square error (RMSE). Before starting the calibration process itself, a sensitivity analysis of the model-simulated results was performed to several input parameters. This analysis was only performed for the site Flona do Tapajós km 67, where it was observed that the minimum RMSE was reached with the parameters $\beta_2 = 0.98$, $V_{max} = 65$ mol m^{-2} s^{-1}, $m = 9$ and $C_{HS} = 2.1{,}10^5$ J m^{-2} °C^{-1}. After individual calibration for each site, the model-simulated results were well adjusted to the data observed in all sites, therefore satisfactorily representing

the hourly variability of the net radiation (Rn), incident and reflected photosynthetically active radiation (PAR_{in} and PAR_{out}), sensible heat flux (H), latent heat flux (LE), and either the net ecosystem exchange (NEE) or the carbon flux (FC), except in the case of NEE for the Cuieiras Reserve, as well as the extreme values of H and LE in some cases. However, the estimate of the soil heat flux (G) did not improve with calibration. The most satisfactory calibration was reached at the site Flona do Tapajós km 67. Testing the best parameters obtained in each site in the other sites, provided an initial answer about the representativeness of the calibration performed with data of a single site for an entire ecosystem. In this analysis, however, it was observed that when the single-site calibrated parameters were used in other sites, significant errors were introduced, which might compromise the quality of the simulated results. Thus, it was concluded that the data collected in a single site are not representative for a whole ecosystem, even when it is contiguous. The conclusion drawn from the present work and the difficulties found during its execution have important ramifications. First, there is a real need for the addition of other spatially explicit parameters to the models simulating the surface fluxes; second, both the design and operation of flux measuring networks such as LBA and FLUXNET should be reviewed, as well as the standardization of methodologies should be accomplished in order to avoid systematic differences among the different sites.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos de circulação geral da atmosfera (GCMs) constituem uma abstração da realidade e são formados por milhares de variáveis. Cada variável quantifica uma característica de processos que ocorrem na atmosfera, nos oceanos, na vegetação e no solo, desde os mais simples até os mais complexos. Devido à complexidade dos processos de interação entre a atmosfera e a superfície, submodelos são utilizados, tais como o BATS (Dickinson et al., 1986), o SiB (Sellers et al., 1986,1996), o LSX (Pollard & Thompson, 1995), o LSM (Bonan, 1995), o IBIS (Foley et al., 1996) e o CLM (Oleson et al. 2004), para simular esses processos separadamente dos GCMs. Existem desde modelos que simulam apenas a transferência de massa e energia entre o solo, a vegetação e a atmosfera (BATS, SiB, LSX, LSM, CLM) até versões mais sofisticadas, como é o caso do IBIS que inclui as interações entre a superfície e a atmosfera, o ciclo de carbono, nutrientes e a dinâmica da vegetação.

Esses modelos são formulados para uma representação genérica de uma superfície vegetada, sendo necessário calibrá-los para os casos específicos. A calibração de modelos consiste em comparar os dados medidos com os simulados, visando ajustar os parâmetros do modelo para melhorar sua performance na representação dos processos. Além de aumentar a precisão, a calibração permite o estudo detalhado de casos, possibilitando a melhoria dos modelos conforme as necessidades e recursos disponíveis (Pitman, 2003).

No caso de vastas regiões com clima relativamente homogêneo e cobertas por um mesmo bioma, como a floresta tropical amazônica, ocorre por exemplo em alguns GCMs que os parâmetros biofísicos, fisiológicos e de estrutura da vegetação representados pelo modelo geralmente são considerados homogêneos em todo o bioma, com exceção do índice de área foliar. Isso implica que, para um hipotético clima, espacialmente fixo, e para um mesmo tipo de solo todas as células cobertas pelo mesmo bioma apresentariam fluxos de massa e energia entre a superfície e a atmosfera espacialmente invariáveis ou, no máximo, controlados pelo índice de área foliar da vegetação.

Entretanto, alguns dos resultados preliminares obtidos por meio do projeto LBA – experimento científico internacional liderado pelo Brasil, concernente à interação entre a biosfera e a atmosfera na Amazônia – indicam que regiões cobertas por floresta tropical, com índice de área foliar semelhante, apresentam fluxos consideravelmente diferentes entre si (Carswell et al., 2002; Araújo et al., 2002 e Saleska et al., 2003). Entretanto, ainda não se sabe se essas variações são devidas unicamente às variações do clima entre sítios, e/ou se existem variações na vegetação e solos, que também controlam os fluxos. Caso existam variações no funcionamento ecológico da floresta, também é incerto quais parâmetros controladores do funcionamento do ecossistema apresentam significativa variação espacial na escala simulada. Se, por um lado, os dados referentes aos vários sítios com cobertura vegetal e clima semelhantes indicam resultados conflitantes com o obtido pelos modelos, por outro lado a disponibilidade desses dados permite comparar a representatividade da calibração feita, usando-se dados referentes a um sítio (calibração individual) em outros sítios e vice-versa.

O presente trabalho consiste em avaliar a representatividade de um conjunto de parâmetros biofísicos, obtidos por calibração do modelo IBIS, contra dados coletados em determinado sítio micrometeorológico, na simulação dos fluxos de superfície observados em outros sítios micrometeorológicos, onde a vegetação tem estrutura semelhante. Esta análise

permite discutir se os parâmetros biofísicos da vegetação são significativamente diferentes dentro de um mesmo bioma. Além disso, este trabalho fornece uma resposta inicial quanto à conveniência da utilização de uma calibração genérica para todas as células com floresta tropical, ou quanto à necessidade de introdução de modificações nos modelos de modo a contemplar alguma eventual variação espacial em seus parâmetros.

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição dos sítios experimentais

Para a realização deste trabalho foram considerados os dados coletados em cinco sítios micrometeorológicos de áreas de floresta nativa da Amazônia: Reserva Biológica do Jaru (Ji-Paraná – RO), Reserva do Cuieiras km 34 (Manaus – AM), Floresta Nacional do Tapajós km 67 e km 83 (Belterra – PA) e Flona de Caxiuanã (Melgaço – PA) (Figura 1). Todos os sítios fazem parte do experimento LBA.

O sítio experimental da Reserva Biológica do Jaru (10º46'S, 61º56'W) está localizado aproximadamente a 80 km ao norte de Ji-Paraná-RO e a 120 m acima do nível do mar, com altura média de dossel de 30 m (Alvalá et al., 2002).

O sítio experimental da Reserva do Cuieiras (02º36'S, 60º12'W) está localizada 60 km ao norte de Manaus-AM. O sítio denominado km 34 é caracterizado por uma floresta tropical com altura de dossel de 30 m, com um índice de área foliar que varia de aproximadamente 5,0 (na estação seca) a 6,0 m^2 m^{-2} na estação úmida. Este sítio possui uma vegetação e topografia típica da Amazônia central (Malhi et al., 2002).

A Floresta Nacional do Tapajós está localizada no município de Belterra – PA, à margem da rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163), e possui sítios experimentais próximos às entradas do km 67 (02º51'S, 54º58'W) e km 83 (03º03'01"S, 54º56'W) (Goulden et al., 2004; Saleska et al., 2003). Para os dois sítios a altura média do dossel é de 40 m.

O sítio experimental da Floresta Nacional de Caxiuanã (01º42'S, 51º31'W) está localizado no município de Melgaço-PA, cerca de 350 km a oeste da cidade de Belém-PA. A extensão da Flona é de 33000 hectares, com uma densa floresta de terra firme, com altura do dossel de aproximadamente 35 m e índice de área foliar variando entre 5 e 6 m^2 m^{-2} (Carswell et al., 2002).

2.2. Dados

2.2.1. Descrição dos dados

Neste trabalho foram utilizados os dados coletados por estações meteorológicas, sistemas de covariância de vórtices turbulentos e por sensores de fluxo de calor no solo nos diversos sítios na Amazônia, compreendendo o seguinte conjunto de dados: radiação solar incidente (S_{in}); radiação de onda longa incidente (L_{in}); radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e refletida (PAR_{out}); saldo de radiação (R_n); temperatura do ar (T_a); velocidade horizontal do vento (u_a); velocidade de fricção do vento (u^*); precipitação (P); umidade específica do ar (q_a); fluxo de calor sensível (H); fluxo de calor latente (LE); e troca líquida de CO_2 do ecossistema (NEE) ou fluxo de CO_2 (F_C). Todas essas medidas foram tomadas acima do dossel; entretanto, o fluxo de calor no solo (G) foi medido entre 1 e 10 centímetros de profundidade.

As variáveis S_{in}, L_{in}, T_a, q_a, u_a e P foram usadas para forçar o modelo, enquanto as demais, quando disponíveis, usadas para verificar o desempenho do modelo. Em alguns sítios (Tapajós km 67 e km 83) os dados de L_{in} não foram coletados. Neste caso, L_{in} foi estimado

por meio da expressão $L_{in} = R_n - S_{in} + \lambda \sigma T_a^4$, em que se supõe que a temperatura efetiva da emissão do dossel é igual à temperatura absoluta do ar, onde λ é a emissividade, σ é a Constante de Stefan-Boltzmann e T_a a temperatura absoluta do ar.

A série de dados da Reserva Biológica do Jaru foi obtida no Sistema de Dados e Informações do LBA (http://beija-flor.cptec.inpe.br), no período de 30/03/1999 a 24/11/1999, disponível em intervalo de 30 minutos. Foram utilizados dados de S_{in}, L_{in}, T_a, q_a, u_a, P, R_n, PAR_{in}, H, LE, F_C e u^*, coletados a 60 m de altura.

A série de dados da Reserva do Cuieiras km 34 foi retirada do Sistema de Dados e Informações do LBA (http://beija-flor.cptec.inpe.br), disponível como médias de 1 hora para o período de 16/06/1999 a 18/09/2000. Utilizaram-se os dados de S_{in}, L_{in}, T_a, q_a, u_a, P, R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, H, LE, NEE e u^*, coletados a 54 m de altura.

A série da Flona do Tapajós km 67 (dados fornecidos por Scott Saleska, Harvard University) abrange o período de 12/04/2001 a 14/07/2002, como médias de 1 hora. Utilizaram-se dados de S_{in}, T_a, q_a, u_a, P, R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, H, LE, NEE e u^*, coletados a 65 m de altura.

A série da Flona do Tapajós km 83 (dados fornecidos por Humberto Rocha, USP e Scott Miller, UC – Irvine) refere-se ao período de 01/07/2000 a 30/06/2001, sendo como médias de 30 minutos. Esses dados foram coletados antes do corte seletivo da floresta, no sítio da Flona km 83, que ocorreu em setembro de 2001. Os dados utilizados foram S_{in}, T_a, q_a, u_a, P, R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, G, H, LE, NEE e u^*, coletados a 65 m de altura.

A série de dados da Flona de Caxiuanã (dados cedidos por José Maria N. Costa, UFV) corresponde ao período de 01/02/2001 a 28/12/2002, contém dados de S_{in}, L_{in}, u_a, P, R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, H, LE e u^* em médias de 30 ou 60 minutos, dependendo da variável (Santos & Costa, 2003).

Maiores detalhes sobre as séries de dados estão disponíveis nos metadados do Sistema de Informação e Dados do LBA (http://beija-flor.cptec.inpe.br).

2.2.2. Análise de erros e filtragem de valores espúrios

Os dados coletados em experimentos de campo contêm, geralmente, vários tipos de erros: erros grosseiros, que provêm do funcionamento inadequado dos equipamentos, tais como manutenção, queda de energia, leituras erradas, etc; erros sistemáticos, geralmente provenientes de descalibração dos instrumentos, não linearidade da curva de calibração, ou uso de fórmulas inadequadas para obtenção de valores finais; e erros aleatórios, que são devidos às variações na tensão da rede elétrica, ruídos, interferências ou instabilidade nos instrumentos, entre outros.

Embora uma parte significativa dos erros presentes nos dados brutos tenha sido eliminada no pós-processamento das observações, algumas séries de dados obtidas ainda continham alguns valores espúrios, que foram filtrados de acordo com os seguintes critérios: $PAR_{in} < -10$ μmol m^{-2} s^{-1}; $G > 50$ W m^{-2} ou $G < -50$ W m^{-2}; $L_{in} > 500$ W m^{-2} ou $L_{in} < 350$ W m^{-2}; $R_n < -100$ W m^{-2} ou $R_n > 1200$ W m^{-2}.

Na Figura 2 é apresentada a disponibilidade do conjunto dos dados usados na entrada do modelo e as falhas em cada série, após a filtragem dos valores espúrios, para os cinco sítios. As séries de dados, efetivamente usadas, tem duração de 174 dias (sítio de Caxiuanã) a 459 dias (sítio do Cuieiras), com falhas variando entre 0,3% (sítio do Cuieiras km 34) e 59% (sítio de Caxiuanã). A série de dados da Flona de Caxiuanã, além de ser relativamente curta, tem uma fração elevada de falhas. Devido a essas características, esta série foi classificada como não apropriada para o processo de calibração; portanto, não foi feita calibração para o sítio de Caxiuanã.

2.2.3. Preenchimento de falhas dos dados de entrada

Para que pudessem ser utilizados como dados de entrada pelo IBIS, os dados tiveram todas as suas falhas preenchidas por interpolação, de acordo com as segu0intes relações (Senna, 2004):

- se o número de pontos de falhas (f) for menor ou igual a 3 horas

$$X_i = X_p + \frac{\left(X_{p+f+1} - X_p\right)}{f+1}.(i-p) \qquad \text{Eq.1}$$

em que, X_i é o valor a ser preenchido, X_p é o antecessor da falha e X_{p+f+1} é o sucessor da falha, *i* são as células que estão interpoladas e *p* é a célula que precede a falha.

- se a duração da falha for maior que 3 horas e menor que 24 horas:

$$X_i = X_{i-24} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1}.\left(X_p - X_{p-24}\right) + \frac{(i-p)}{f+1}.\left(X_{p+f+1} - X_{p+f+1-24}\right) \qquad \text{Eq. 2}$$

- se a duração da falha for maior ou igual a 24 horas:

$$X_i = X_{i-24m} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1}.\left(X_p - X_{p-24m}\right) + \frac{(i-p)}{f+1}.\left(X_{p+f+1} - X_{p+f+1-24m}\right) \qquad \text{Eq. 3}$$

em que *m* é a parte inteira de (*f*/24 +1). Estas equações de interpolação fazem com que o período sem dados siga o mesmo comportamento de um período similar com dados, preenchendo as falhas de forma mais realística do que uma interpolação linear.

2.2.4- Filtragem dos dados de validação do modelo

Inicialmente os dados usados na validação dos resultados do modelo foram tratados para eliminar os erros grosseiros, como erros no acerto do relógio do sistema de aquisição automática de dados, bem como os valores espúrios, principalmente na série de NEE do sítio do Cuieiras km 34.

Os dados que seriam utilizados para validação dos resultados do modelo foram filtrados de acordo com três critérios: o critério de filtragem dos dados de entrada, o critério do limiar da velocidade de atrito e o critério do fechamento do balanço de energia.

O critério de filtragem dos dados de entrada é utilizado para evitar que inconsistências introduzidas nesses dados, devido ao processo de preenchimento das falhas, sejam repassadas aos dados de saída. Assim, os horários em que o modelo foi alimentado por dados preenchidos foram eliminados da análise.

O critério do limiar da velocidade de atrito baseia-se no questionamento que alguns autores (Curtis et al., 2002; Saleska et al., 2003; Kruijt et al., 2004) apresentam, sobre a validade dos fluxos de CO_2 medidos pelo sistema de covariância de vórtices turbulentos em condições de baixa turbulência, pois, nessas condições, o fluxo de CO_2 poderia não ser detectado pelo sistema de covariância de vórtices. A Tabela 1 mostra a fração dos dados de H e LE, que está no intervalo estabelecido para $u^* > u^*_0$. Neste trabalho foi usado $u^*_0 = 0{,}1$ m s^{-1}, ou seja, os períodos que apresentaram valores inferiores a $u^*_0 = 0{,}1$ m.s^{-1} foram descartados da análise.

O critério do fechamento do balanço de energia é necessário, pois as medidas dos principais componentes do balanço de energia, feitas por instrumentos independentes, freqüentemente não são consistentes com o princípio de conservação de energia ($Rn = H + LE + G + S + R$, em que S é a taxa de variação da energia armazenada no dossel e R é o fluxo residual associado ao erro). Resultados disponíveis na literatura têm mostrado que a soma dos fluxos de calor sensível e latente pelo método de covariância de vórtices turbulentos é, geralmente, menor que a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo (Kustas et al., 1999; Twine et al., 2000), nestas condições em que o fechamento do balanço de energia é pobre, inconsistências são introduzidas nos fluxos turbulentos, como a observada por von Randow et al., (2004). O viés no fechamento do balanço de energia,

definido por (1–[H+LE]/[R_n–G–S]), existe em todos os sítios micrometeorológicos. A Tabela 2 mostra qual a fração dos dados diários de H+LE que está dentro do intervalo [(1–δ)(R_n–G), (1+δ)(R_n–G)] para cada um dos sítios em estudo, em que δ é a fração permitida no fechamento do balanço de energia. Nos sítios em que os dados de G não estavam disponíveis, estes foram supostos como desprezíveis, o que é razoável para médias diárias. Pela mesma razão, *S* também foi considerado igual a zero. No presente trabalho foram aproveitados apenas os valores cujo balanço de energia diário medido pelo sistema de vórtices turbulentos estava dentro de 40% ($\delta = 0{,}4$) do balanço de energia medido pelos instrumentos radiativos e de fluxo de calor no solo, de acordo com

$$(1-\delta) \le \left| \frac{H + LE}{Rn - G} \right| \le (1+\delta)\,. \qquad \text{Eq. 4}$$

A Tabela 3 mostra as frações dos dados de H e LE, filtrados de acordo com os três critérios adotados.

2.3. Descrição do IBIS

O IBIS faz parte de uma nova geração de modelos de biosfera global, classificado como um modelo dinâmico da vegetação global, que considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em resposta às condições ambientais. Este modelo compreende diversos processos, incluindo as interações entre a superfície e a atmosfera, ciclos de CO_2 e nutrientes, e dinâmica da vegetação (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000). É um dos poucos modelos a incorporar uma variedade de processos do ecossistema em uma única estrutura, incluindo: troca de energia, água e de dióxido de CO_2 entre solo, plantas e atmosfera; processos fisiológicos das plantas e organismos do solo, incluindo assimilação de CO_2 e respiração; crescimento e competição entre plantas; ciclo de nutrientes (C, N) e processos físicos do solo.

O trabalho inicial de calibração da versão 2.0 do IBIS, para cinco diferentes regiões do globo, foi desenvolvido por Delire e Foley (1999) e Kucharik et al. (2000), usando diversas medidas biofísicas, dentre as quais destacam-se as medições de fluxos obtidos no sítio da Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru), na campanha do Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study (ABRACOS).

O modelo segue uma hierarquia conceitual (Fig. 3) e inclui submodelos (ou módulos) organizados de acordo com a escala temporal: processos de superfície (transferência de energia, água, CO_2 e momentum), biogeoquímica do solo (ciclo do nitrogênio e do CO_2), dinâmica da vegetação (competição das plantas por luz, água e nutrientes) e fenologia (baseada no crescimento medido por graus-dia). Segue-se a descrição de alguns processos representados pelo IBIS.

2.3.1. Fisiologia vegetal e condutância estomática

O modelo simula a assimilação de CO_2 e a respiração na escala da folha utilizando as equações de Farquhar (Farquhar et al., 1980; Farquhar e Sharkey, 1982): a assimilação de CO_2 bruta (A_g) é uma função da luz absorvida ($APAR$), da temperatura da folha (T), da concentração interna de CO_2 (c_i), e da capacidade máxima da enzima Rubisco ($V_{máx}$); a respiração de manutenção (R_d) é uma função apenas de $V_{máx}$. Logo, temos que a assimilação de CO_2 líquida (A_n) é representada por:

$$A_n = A_g - R_d \qquad \text{Eq.5}$$

$$A_g = \min\left(J_e, J_c\right) \qquad \text{Eq.6}$$

$$J_e = \alpha_3 . APAR \frac{c_i - \Gamma_*}{c_i + 2\Gamma_*} \qquad \text{Eq.7}$$

$$J_c = \frac{V_m\left(c_i - \Gamma_*\right)}{c_i + K_c\left(1 + \frac{[O_2]}{K_o}\right)} \qquad \text{Eq.8}$$

$$c_i = c_s - \frac{1{,}6A_n}{g_s} \qquad \text{Eq.9}$$

$$V_m = V_{máx}.\omega(T).\omega(S) \qquad \text{Eq. 10}$$

$$R_d = \zeta.V_{máx} \qquad \text{Eq. 11}$$

em que J_e é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz, J_c é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela Rubisco, Γ_* é o ponto de compensação para a assimilação de CO_2 bruta, K_c, K_o são os coeficientes de Michaelis-Menten para CO_2 e O_2, em que $K_c = 1{,}5 \times 10^{-4}$ e $K_o = 0{,}25$ a (15°C), $\omega(T)$ é a função de estresse devido à temperatura, $\omega(S)$ é a função de estresse devido à umidade do solo, α_3 é a eficiência quântica da planta C_3 e ζ é o custo de respiração da atividade da Rubisco.

A condutância estomática (g_s) é simulada como uma função da A_n, da concentração de CO_2 na camada-limite foliar (c_s) e da umidade relativa do ar (h_a), conforme Leuning (1995):

$$g_s = m\frac{A_n h_a}{c_s} + b \qquad \text{Eq. 12}$$

onde m é o coeficiente relacionado à condutância estomática e b é o intercepto da relação linear.

2.3.2. Troca líquida de CO_2 do ecossistema

A simulação de *NEE* pelo IBIS é uma função da respiração heterotrófica (R_H) e da produção primária líquida do ecossistema (*NPP*, sigla em inglês). *NPP* é uma função da produtividade primária total (*GPP*, sigla em inglês) e da respiração autotrófica (R_A) do

ecossistema (soma da respiração de manutenção e custo de alocação de CO_2). R_H é a soma da taxa de decomposição dos reservatórios metabólicos, lignina e estrutural de CO_2 das folhas, galhos e raízes em decomposição.

$$NEE = R_H - NPP, \qquad \text{Eq. 13}$$

$$NPP = GPP - R_A = 0,7 \int A_n \, dt, \qquad \text{Eq. 14}$$

2.3.3. Distribuição das raízes

O sistema radicular desenvolve-se de acordo com o tipo de planta e as diversas características do solo, tais como os valores de pH, o conteúdo nutricional do solo, o balanço hídrico, a aeração e a profundidade do solo, a presença de uma barreira ou a compactação de um horizonte (Larcher, 2000).

O IBIS representa a distribuição vertical do sistema radicular de acordo com a Equação 15, proposta por Jackson et al. (1997), representada por

$$Y(d) = \frac{1 - \beta_2^{\,d}}{1 - \beta_2^{\,d_{máx}}}, \qquad \text{Eq. 15}$$

em que, $Y(d)$ é a fração de raízes finas entre a superfície e a profundidade do solo d (cm), $d_{máx}$ é a profundidade máxima do solo e β_2 é um parâmetro de distribuição de raízes finas. Para o ecossistema de floresta tropical, Jackson et al. (1996) sugeriram β_2 = 0,962 para raízes totais, enquanto Jackson et al. (1997) sugeriram β_2 = 0,972 para raízes finas, considerando que as raízes finas são mais importantes para a captura de água e nutrientes. Em geral, valores de β_2 mais próximos à unidade indicam uma distribuição de raízes mais uniforme no perfil do

solo, enquanto valores de β_2 mais próximos a zero indicam raízes concentradas próximo à superfície. A Figura 4 representa, esquematicamente, a variação de Y em relação a d, para diversos valores de β_2.

2.3.4. Fluxos de calor sensível e latente

O IBIS simula o balanço de radiação da vegetação e do solo, e o particiona em fluxos difusos e turbulentos de calor sensível e latente. Em geral, essa partição depende principalmente da condutância estomática (g_s): quanto maior g_s, maior será a fração LE/R_n.

Por sua vez, g_s depende principalmente da taxa de assimilação de CO_2 líquida, a qual é controlada pela APAR e por $V_{máx}$, o que inclui estressores térmicos e de umidade do solo (Eqs. 5 a 11). A_n é sensível principalmente aos parâmetros $V_{máx}$ e β_2, enquanto g_s responde também ao parâmetro m. Em geral, quanto maior $V_{máx}$, maior será J_c, A_g, A_n, g_s e LE/R_n, desde que $J_c < J_e$. Seguindo o mesmo raciocínio, quanto maior β_2, mais profundas as raízes, menor o estresse hídrico, maior $V_{máx}$, J_c, A_g, A_n, g_s e LE/R_n, novamente respeitada a condição $J_c < J_e$. E quanto maior m, maior g_s e LE/R_n. Por outro lado, a capacidade térmica do dossel influencia a amplitude térmica do dossel durante o dia e afeta a amplitude diária de H: quanto menor a capacidade térmica dos galhos no dossel superior (C_{HS}), maior será a amplitude de H. Uma análise de sensibilidade de H e LE a estes parâmetros foi realizada, conforme descrito a seguir.

O IBIS estima PAR_{in} através da relação $PAR_{in} = 4{,}59 . a . S_{in}$, onde 4,59 é um fator de conversão de W m^{-2} para μmol m^{-2} s^{-1}. Em todas as simulações, foi usado o valor a = 0,46, obtido da regressão linear entre os valores de PAR_{in} e S_{in} medidos no sítio Flona do Tapajós km 83.

2.4. Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo

Antes de iniciar o processo de calibração propriamente dito, foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados simulados pelo modelo aos diversos parâmetros de entrada.

A análise de sensibilidade foi feita apenas para o sítio Flona do Tapajós km 67. Inicialmente, foi testada a sensibilidade do modelo a oito parâmetros: a distribuição de raízes finas (β_2); capacidade da enzima Rubisco a 15°C ($V_{máx}$); o coeficiente angular relacionado à condutância estomática (m); a capacidade térmica das folhas (C_{HU}) e galhos (C_{HS}) no dossel superior, e folhas e galhos no dossel inferior (C_{HL}); e a umidade inicial do solo (w_{soi}). Verificou-se que o modelo era mais sensível a quatro desses parâmetros: β_2, $V_{máx}$, m e C_{HS}.

Foram feitas simulações cobrindo uma ampla faixa de variações desses parâmetros, a fim de verificar detalhadamente a sensibilidade do modelo aos diferentes parâmetros. Os resultados desta análise estão na Seção 3.1.

2.5. Calibração do modelo em sítios individuais

Diversas metodologias para calibração de modelos de transferência de massa e energia entre o solo, a vegetação e a atmosfera (LSMs) têm sido propostas na literatura. Uma dessas metodologias propõe a minimização da RMSE da razão LE/(H+LE), usada inicialmente por Sellers et al. (1989) e por outros autores (Rocha et al., 1996; Correia, 2005). Outra metodologia consiste na calibração multi-objetiva de modelos, cuja meta é obter o valor preferencial de n parâmetros sob calibração, que minimize funções objetivas de medição de variância do erro entre os valores simulados e observados. Entretanto, devido a diversos fatores, tais como a complexidade dos modelos, interrelação dos diversos processos representados, erros na estrutura do modelo, dentre outros, a minimização multi-objetiva fornece, geralmente, um conjunto de soluções, muitas vezes consideravelmente diferentes e, às vezes incompatíveis entre si.

No presente trabalho pretendeu-se introduzir e testar o conceito de calibração hierárquica de LSMs. Este conceito tenta espelhar a hierarquia dos processos que determinam o funcionamento de um ecossistema. Os processos primários que determinam o funcionamento de um ecossistema são o balanço de radiação solar, de onde advém a assimilação de CO_2 e o aquecimento de todo o sistema, bem como o saldo de radiação, que inclui a radiação solar e infravermelha terrestre. Em segundo lugar, vem a partição do balanço de radiação em fluxos de calor sensível e latente, e fluxo de calor no solo, além do balanço de CO_2 diurno. Em terceiro lugar, os fluxos de CO_2 durante a noite, que representam a respiração do ecossistema e, finalmente, o balanço total de CO_2. Esta metodologia reconhece também que os processos mais lentos são uma integração dos processos mais rápidos, pois o modelo é inicialmente calibrado para os processos quase instantâneos (balanço de radiação), seguindo-se os processos da escala de tempo de minutos ou horas (fluxos de energia e massa), seguidos pelos processos diurnos (balanço de CO_2 diurno/noturno).

A qualidade da calibração foi avaliada de acordo com o erro relativo médio (ε), com a raiz do erro quadrado médio (RMSE), correlação entre os dados simulados e os dados observados (ρ), pela inclinação da reta de regressão dos dados simulados em função dos dados observados (α), e por uma análise do comportamento cumulativo dos resultados do modelo em relação aos dados.

O processo de calibração envolve uma quantidade razoavelmente grande de simulações, selecionando-se, em cada uma delas, valores para alguns parâmetros do modelo, escolhidos dentro de uma faixa pré-estabelecida. Em cada simulação os resultados de saída do modelo são comparados com os dados observados, calculando-se, entre as duas séries de valores ρ, α, ε e RMSE, representados por:

$$\varepsilon = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{S-O}{O}, \qquad \text{Eq.16}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{I=1}^{n}(S-O)^2}\ , \qquad \text{Eq.17}$$

$$\alpha = \frac{N\sum O.S - \left(\sum O\right)\left(\sum S\right)}{N\sum O^2 - \left(\sum O\right)^2}, \qquad \text{Eq.18}$$

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

Foram calibrados apenas os parâmetros aos quais o modelo demonstrou-se mais sensível: o parâmetro de distribuição de raízes finas (β_2), a capacidade máxima da enzima Rubisco a 15°C ($V_{máx}$), o coeficiente angular relacionado à condutância estomática (m) e a capacidade térmica dos galhos (C_{HS}). Os resultados da calibração estão na Seção 3.2.

2.6. Teste da calibração em outros sítios

Além da incerteza relacionada à causa das variações nos fluxos de energia e massa entre os sítios de floresta tropical, outra dúvida existente refere-se aos erros a serem esperados, quando se utiliza um único conjunto de parâmetros em todos os sítios ou, por extensão, os erros esperados quando se utiliza um único conjunto de parâmetros em toda a Amazônia, como no caso de um modelo climático. Embora estas sejam questões de difícil resposta, no presente trabalho pretendeu propor uma resposta inicial a essas perguntas.

Nesta seção, o modelo IBIS foi calibrado utilizando-se os melhores resultados obtidos com os procedimentos descritos na Seção 2.5, porém repetindo-se as melhores calibrações obtidas em cada sítio nos demais sítios. A diferença entre os fluxos simulados por meio de uma simulação e outra indicará os erros esperados, se for utilizado um único conjunto de parâmetros em todos os sítios. De acordo com os resultados obtidos, será decidido se é conveniente continuar a usar uma calibração genérica para todas as células com floresta

tropical ou se é necessário introduzir modificações no modelo, de modo a contemplar alguma eventual variação espacial nos parâmetros do modelo. Os resultados destes testes estão na Seção 3.3.

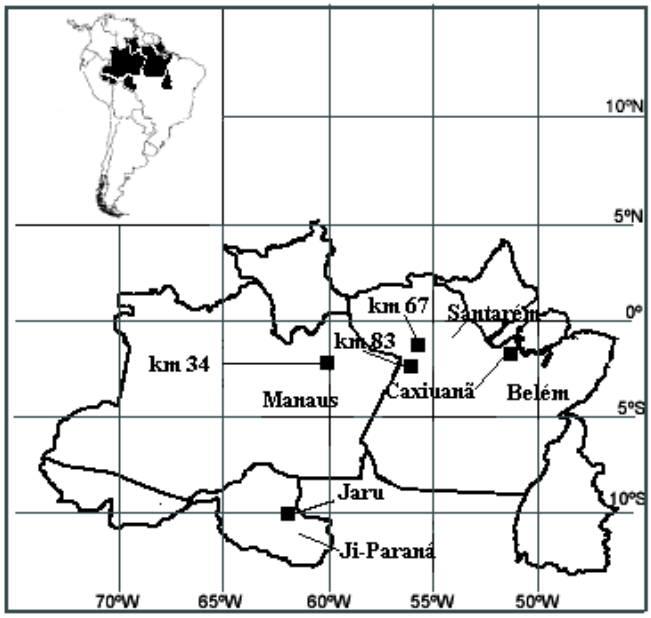

Figura 1-Mapa com a localização dos sítios micrometeorológicos utilizados neste trabalho.

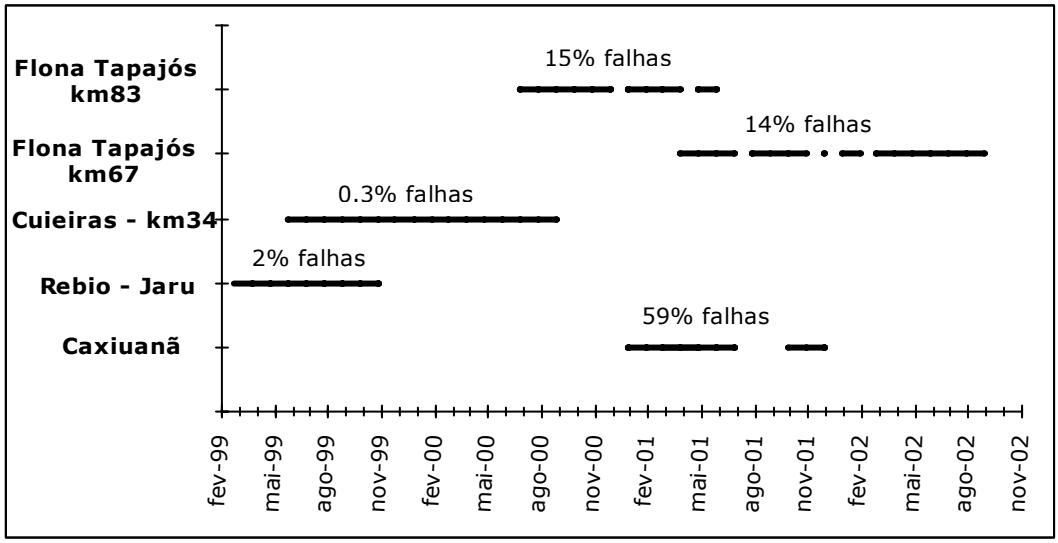

Figura 2-Disponibilidade dos dados (traço negro) e as falhas (em branco) para os cinco sítios experimentais, durante o período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2003. A porcentagem de falhas no período de disponibilidade também é indicada.

Tabela 1-Porcentagem dos dados de H e LE quando $u^* > u^*_0$ em função de u^*_0 (u^*_0 em $m.s^{-1}$).

Sítios	$u^*_0 = 0,0$	$u^*_0 = 0,1$	$u^*_0 = 0,2$	$u^*_0 = 0,3$	$u^*_0 = 0,4$
Flona do Tapajós km 83	100%	75%	53%	39%	28%
Flona do Tapajós km 67	100%	77%	60%	42%	27%
Reserva do Cuieiras km 34	100%	96%	74%	43%	17%
Rebio Jaru	100%	51%	34%	21%	12%
Média	100%	76%	56%	37%	21%

Tabela 2-Porcentagem dos dados aproveitáveis de H e LE em função de δ.

Sítios	$\delta = 0,1$	$\delta = 0,2$	$\delta = 0,3$	$\delta = 0,4$	$\delta = \infty$
Flona do Tapajós km 83	32%	50%	58%	61%	100%
Flona do Tapajós km 67	81%	96%	97%	98%	100%
Reserva do Cuieiras km 34	21%	53%	72%	87%	100%
Rebio Jaru	2%	6%	17%	35%	100%
Média	37%	55%	64%	72%	100%

Tabela 3-Porcentagem dos dados aproveitáveis de H e LE para condições em que não foi utilizada filtragem e em função do flag, δ, u^*_0, utilizando os três critérios.

Sítios	Sem Filtragem	Com filtragem			
		Dados de entrada	$\delta = 0,4$	$u^*_0 = 0,1$	3 critérios
Flona do Tapajós km 83	100%	92%	61%	75%	50%
Flona do Tapajós km 67	100%	83%	98%	77%	73%
Reserva do Cuieiras km 34	100%	99,7%	87%	96%	80%
Rebio Jaru	100%	89%	35%	51%	20%
Média	100%	92%	72%	76%	56%

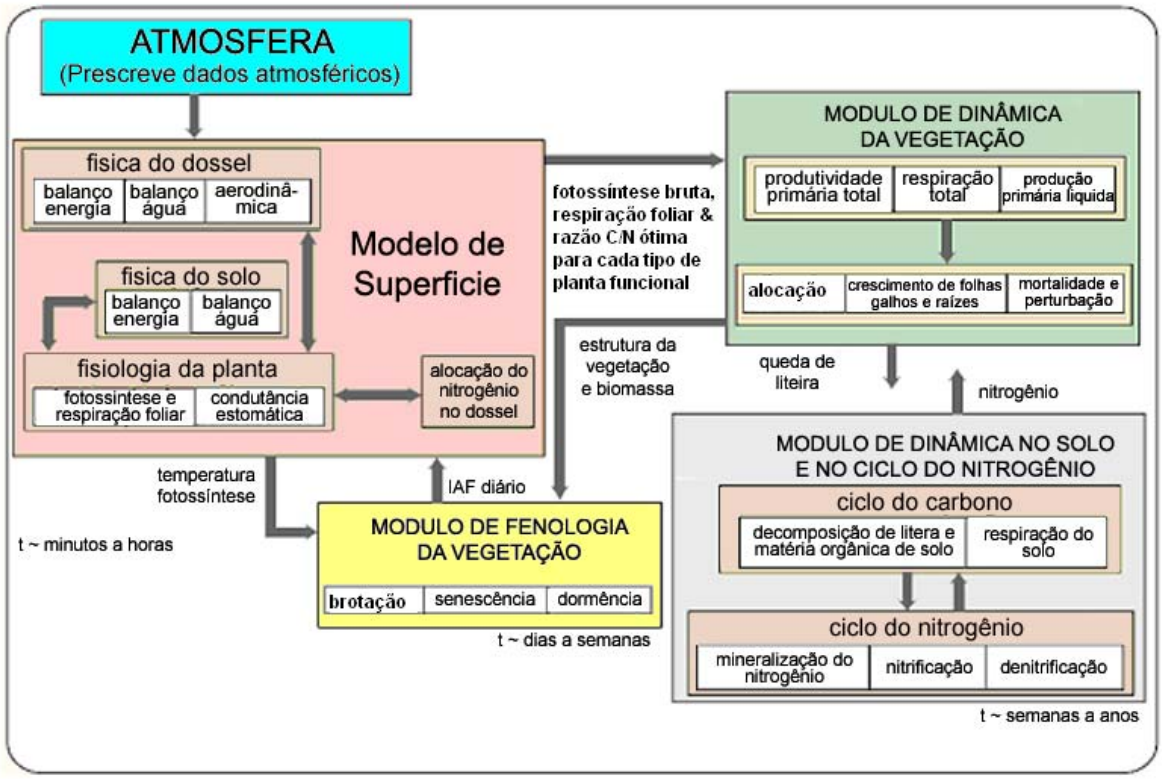

Figura 3-Esquema com as características dos processos do modelo de ecossistema terrestre IBIS.

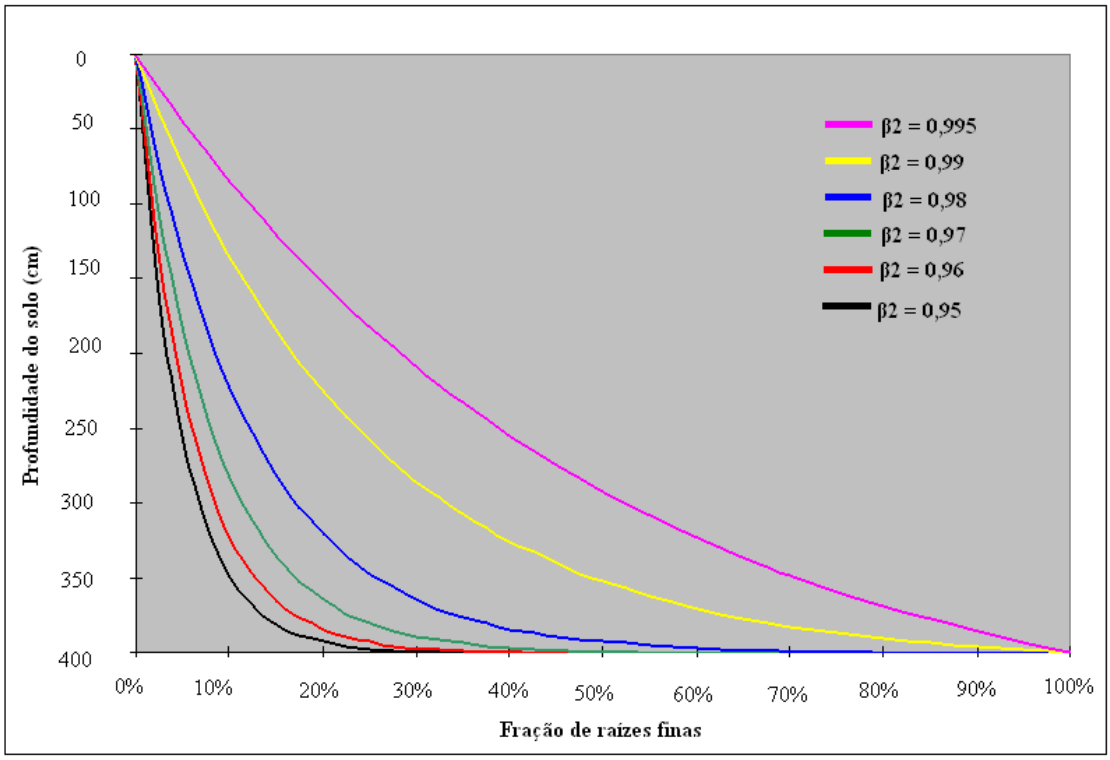

Figura 4-Variação da fração acumulada de raízes finas (Y) com a profundidade do solo (cm), para diversos valores de β_2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de sensibilidade aos parâmetros do modelo

As Figuras 5 a 8 apresentam a sensibilidade da raiz do erro quadrado médio entre os valores simulados e observados de H e LE, em função da variação de m, $V_{máx}$, β_2 e C_{HS}. Os valores de RMSE do fluxo de calor sensível ($RMSE_H$), fluxo de calor latente ($RMSE_{LE}$) e o valor médio ($RMSE_{H-LE}$) = [($RMSE_H$ + $RMSE_{LE}$)/2] em função de m são apresentados na Figura 5. As Figuras 5a a 5c apresentam a sensibilidade para diferentes valores de β_2, fixando-se $V_{máx}$ em 65 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e C_{HS} em $1{,}054.10^5$ J m^{-2} °C^{-1}; a sensibilidade para diferentes valores de $V_{máx}$, fixando-se β_2 em 0,950 e C_{HS} em $1{,}054.10^5$ J m^{-2} °C^{-1}, é apresentada nas Figuras 5d a 5f; a sensibilidade para diferentes valores de C_{HS} , fixando-se $V_{máx}$ em 65 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e β_2 em 0,950, é apresentada nas Figuras 5g a 5i.

Os valores de $RMSE_H$, $RMSE_{LE}$ e $RMSE_{H-LE}$ em função de $V_{máx}$ são apresentados na Figura 6. As figuras 6a a 6c apresentam a sensibilidade para diferentes valores de β_2, fixando-se m em 11 e C_{HS} em $1{,}054.10^5$ J m^{-2} °C^{-1}; a sensibilidade para diferentes valores de m, fixando-se β_2 em 0,950 e C_{HS} em $1{,}054.10^5$ J m^{-2} °C^{-1}, é apresentada nas figuras 6d a 6f; e

as figuras 6g a 6i apresentam a sensibilidade para diferentes valores de C_{HS}, fixando-se m em 11 e β_2 em 0,950.

Os valores de $RMSE_H$, $RMSE_{LE}$ e $RMSE_{H\text{-}LE}$ em função de β_2 são apresentados na Figura 7. As figuras 7a a 7c apresentam a sensibilidade para diferentes valores de $V_{máx}$, fixando-se m em 11 e C_{HS} em $1{,}054.10^5$ J m^{-2} $°C^{-1}$; a sensibilidade para diferentes valores de m, fixando-se $V_{máx}$ em 75 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e C_{HS} em $1{,}054.10^5$ J m^{-2} $°C^{-1}$, é mostrada nas figuras 7d a 7f; e as figuras 7g a 7i apresentam a sensibilidade para diferentes valores de C_{HS}, fixando-se $V_{máx}$ em 75 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e m em 11.

Os valores $RMSE_H$, $RMSE_{LE}$ e $RMSE_{H\text{-}LE}$ em função de C_{HS} são apresentados na Figura 8. As figuras 8a a 8c apresentam a sensibilidade para diferentes valores de β_2, fixando-se m em 11 e $V_{máx}$ em 65 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}; a sensibilidade para diferentes valores de $V_{máx}$, fixando-se β_2 em 0,950 e m em 11, é apresentada nas figuras 8d a 8f; as figuras 8g a 8i apresentam a sensibilidade para diferentes valores de m, fixando-se $V_{máx}$ em 65 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e β_2 em 0,950.

A análise dos valores de $RMSE_H$ indica que este é pouco sensível aos parâmetros m e $V_{máx}$, um pouco mais sensível a β_2 e bastante sensível a C_{HS} (principalmente na faixa de $C_{HS} < 2.10^5$ J m^{-2} $°C^{-1}$). Esse comportamento é consistente com a estrutura do modelo pois m e $V_{máx}$ controlam principalmente a condutância estomática e têm uma relação apenas indireta com H. Da mesma maneira, β_2 atua no controle das respostas do estresse hídrico e controla, indiretamente, o valor de V_m. Por outro lado, C_{HS} controla a amplitude térmica do dossel, sendo fundamentalmente importante na definição da diferença de temperatura entre o dossel e o ar.

A análise dos valores de $RMSE_{LE}$ indica um comportamento contrário àquele de $RMSE_H$: forte resposta a β_2, principalmente para $\beta_2 > 0{,}98$, uma sensibilidade intermediária a

m e $V_{máx}$ e pouca sensibilidade a C_{HS}. Estes resultados também são consistentes com a maneira pela qual o modelo opera, pois β_2 é o parâmetro responsável pelo estresse hídrico.

A análise de $RMSE_{H\text{-}LE}$ médio indica que o RMSE mínimo para ambos os fluxos (H e LE) é da ordem de 45 W m^{-2}, atingido com o conjunto de parâmetros β_2 = 0,98, C_{HS} = $2{,}1.10^5$ J m^{-2} °C^{-1}, m = 9 e $V_{máx}$ = 65 μmol m^{-2} s^{-1}.

A análise é consistente com um ecossistema com ligeiro estresse hídrico, que não necessita de raízes extremamente profundas (β_2 intermediário) e tem uma condutância estomática relativamente baixa (m e $V_{máx}$ baixos).

Para obtenção de parâmetros mais consistentes para o sítio do Tapajós km 67 foi necessário aumentar a distribuição de raízes finas (β_2), provocando uma diminuição no estresse hídrico, devido à maior disponibilidade de água.

3.2. Calibração individual

O modelo foi inicialmente calibrado para o sítio da Flona do Tapajós km 83, seguido pela Flona do Tapajós km 67, Reserva do Cuieiras km 34 e Reserva Biológica do Jaru. Foram feitas aproximadamente noventa e cinco simulações para cada sítio, sendo os parâmetros testados numa faixa pré-estabelecida. Os valores desses parâmetros variaram nos seguintes intervalos: β_2 de 0,950 a 0,999; $V_{máx}$ de 65 μmol m^{-2} s^{-1} a 120 μmol m^{-2} s^{-1}; m de 9 a 12; C_{HS} de $0{,}263.10^5$ J m^{-2} °C^{-1}a $2{,}109.\ 10^5$ J m^{-2} °C^{-1} e C_{HU} de $1{,}054.10^3$ J m^{-2} °C^{-1}a $8{,}436.10^3$ J m^{-2} °C^{-1}.

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros iniciais utilizados pelo modelo antes da calibração e após a calibração individual para cada sítio. Em seguida, as Seções 3.2.1 a 3.2.4 apresentam os resultados das melhores calibrações para cada um dos sítios, enquanto na seção 3.2.5 discutem-se os resultados de maneira geral.

3.2.1. Flona do Tapajós (km 83)

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de correlação (ρ), coeficientes de inclinação da reta de regressão linear entre os valores simulados e observados (α), erro relativo médio (ε) e RMSE entre os dados observados e simulados, para as simulações com os parâmetros iniciais do modelo e com os parâmetros calibrados, para o sítio da Flona do Tapajós km 83. Com os parâmetros iniciais, o modelo simula bem o R_n, PAR_{in} e PAR_{out}, apresentando ρ e α satisfatórios, e um baixo ε. O modelo não estima bem H e LE, apresentando baixos ρ e α, e valores altos de ε. O modelo superestima H e NEE e subestima G e LE para o período de simulação.

O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo IBIS produz melhores resultados na determinação de H e LE (Tab. 5), com melhores valores de ρ e α, bem como diminuição em ε e em RMSE. A estimativa de G não melhorou com a calibração. No caso de NEE, houve uma melhora significativa em ρ e α, uma ligeira redução em RMSE e um pequeno aumento em ε, o que é discutido a seguir.

As Figuras 9 a 17 mostram resultados da versão calibrada do modelo. A Figura 9 apresenta os gráficos de dispersão para R_n (Fig.9a), G (Fig. 9b), H (Fig. 9c), LE (Fig. 9d) e NEE (Fig. 9e). Os gráficos dos fluxos cumulativos observado e simulado de R_n, H, LE e NEE, em função do tempo, são apresentados na Figura 10. As figuras 11 a 17 apresentam a variação temporal dos fluxos observado e simulado de R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, G, H, LE e NEE, respectivamente, para períodos selecionados.

Após calibrado, o modelo IBIS representa razoavelmente a variação diurna dos fluxos radiativos observados no sítio do Tapajós km 83 (Figs. 11, 12 e 13). O modelo simula bem o R_n cumulativo ao longo do ano, conforme Figura 10a.

A amplitude do G foi superestimada pelo IBIS (Fig. 14), o que é um problema recorrente do modelo (Delire & Foley, 1999). Esta superestimativa pode ser conseqüência da

pouca absorção de radiação pelo dossel (Senna, 2004) ou devido à ausência de efeitos da liteira no cálculo da transferência de calor no solo.

À medida que os processos simulados avançam, de balanço de radiação para os fluxos de energia e culminando no fluxo de CO_2, nota-se um aumento na dispersão dos dados simulados em relação aos dados observados e uma diminuição na correlação entre as variáveis simuladas e observadas (Figs. 9 a 17 e Tab. 5). Este aumento na dispersão é devido à propagação de erros sistemáticos durante o processo de simulação, bem como aos erros aleatórios intrínsecos dos dados observados.

O elevado erro relativo médio (ε) em NEE é, em parte, conseqüência da divergência dos valores simulados e observados de NEE (e LE) após um longo período em abril de 2001 (~ 20 dias), em que os dados de entrada foram preenchidos (Figs. 10c e 10d). Embora este período em que houve preenchimento de falhas não tenha sido utilizado na análise, é possível que o preenchimento dos dados de entrada tenha introduzido alterações em variáveis persistentes, como a umidade do solo, alterações essas que teriam se propagado além do período de preenchimento de falhas.

3.2.2. Flona do Tapajós (km 67)

Os coeficientes ρ e α e os erros ε e RMSE entre os dados observados e simulados, para as simulações com parâmetros não calibrados e não filtrados (inicial) e com parâmetros calibrados (calibrado), para o sítio da Flona do Tapajós km 67, são apresentados na Tabela 6. Com os parâmetros iniciais, o modelo simula bem R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, H e LE, apresentando bons coeficientes de correlação e inclinação e um erro relativo médio, relativamente, baixo. O modelo não estima bem NEE, apresentando baixos coeficientes de correlação e inclinação e um altíssimo ε.

O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo IBIS produz melhores resultados para os fluxos de energia e massa, com valores de ρ, α, ε e RMSE consideravelmente melhores que as estatísticas obtidas no sítio da Flona km 83 (Tab. 5).

As figuras 18 a 25 mostram resultados da versão calibrada do modelo. A Figura 18 apresenta os gráficos de dispersão para R_n, H, LE e NEE, mostrando uma dispersão menor dos dados, quando comparados aos resultados do sítio Flona do Tapajós km 83 (Fig. 9). Os gráficos dos fluxos cumulativos observado e simulado de R_n, H, LE e NEE, em função do tempo, são apresentados na Figura 18. Nesta figura, observa-se que o excesso de R_n simulado reparte-se proporcionalmente entre H e LE. Nota-se, também, o perfil sazonal significativamente diferente de NEE, em relação ao sítio Flona do Tapajós km 83 (Fig. 8). Já nas Figuras 20 a 25, são apresentados os fluxos observado e simulado de R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, H, LE e NEE em função do tempo, para um período de aproximadamente dez dias, em diferentes estações do ano.

O modelo simula bem a variabilidade horária de R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, LE e NEE, exceto em alguns casos isolados durante períodos de pico. Embora simule relativamente bem o ciclo diurno de H, o modelo apresenta algumas dificuldades na simulação de H durante a noite. Entretanto, os valores de ρ, α e RMSE para H na Flona do Tapajós km 67 foram melhores do que na Flona km 83, onde a simulação do ciclo diurno de H foi visualmente melhor.

3.2.3. Reserva do Cuieiras (km 34)

Os coeficientes ρ e α e os erros ε e RMSE entre os dados observados e simulados, para as simulações com parâmetros não calibrados e não filtrados (inicial) e com parâmetros calibrados (calibrado) para o sítio do Cuieiras km 34 são apresentados na Tabela 7. Com os parâmetros não calibrados o modelo simula muito bem R_n, PAR_{in} e PAR_{out}, apresentando resultados melhores do que aqueles para os sítios da Flona. O modelo simula bem LE e,

embora ε inicial de H seja zero, os valores de ρ e α são baixos. O IBIS não consegue simular bem o NEE para o sítio da Reserva do Cuieiras, o que pode ser observado pelos baixos valores de ρ e α e do alto valor de ε.

O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo IBIS produz melhores resultados nos valores de ρ, α e RMSE associados a H, e pouca diferença nos resultados das demais variáveis (Tab. 7).

A Figura 26 apresenta os gráficos de dispersão para R_n, H, LE e NEE. Os gráficos dos fluxos cumulativos observado e simulado de R_n, H, LE e NEE em função do tempo são apresentados na Figura 27. Nas figuras 28 a 33 são apresentados os fluxos observado e simulado de R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, H, LE e NEE em função do tempo para períodos de aproximadamente dez dias em diversas épocas do ano. Apesar do R_n estar sendo um pouco subestimado pelo modelo, a variabilidade horária dos fluxos radiativos R_n, PAR_{in} e PAR_{out} é bem representada (Figs. 27 a 30). O modelo representa bem a variabilidade horária de H e LE, apesar de não conseguir atingir os valores extremos destes fluxos (Figs. 26b, c, 31 e 32).

Comparando a Figura 33 com as figuras 17 e 25, nota-se que os valores de NEE do sítio Cuieiras km 34 não apresentam um ciclo diurno tão bem definido quanto os sítios da Flona do Tapajós. Por esta razão, as estatísticas ρ e α de NEE em Cuieiras estão piores do que nos sítios analisados anteriormente.

3.2.4. Reserva Biológica do Jaru

Os coeficientes ρ e α e os erros ε e RMSE entre os dados observados e simulados, para as simulações com parâmetros não calibrados e não filtrados (inicial) e com parâmetros calibrados (calibrado), para o sítio da Reserva Biológica do Jaru são apresentados na Tabela 8. Com os parâmetros não calibrados, o modelo simula bem R_n e PAR_{in}, apresentando bons coeficientes ρ e α e um baixo ε. As estimativas iniciais de H, LE e Fluxo de gás carbônico

(F_C) são semelhantes àquelas para o sítio Cuieiras km 34, com um baixo ε para H e um alto ε para F_C, assim como valores de ρ e α variando de baixos a intermediários.

O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo IBIS produz melhores resultados na determinação de todos os fluxos, principalmente LE e F_C (Tab. 8).

A Figura 34 apresenta os gráficos de dispersão para R_n, H, LE e NEE/F_C. Na Figura 35 são apresentados os gráficos dos fluxos cumulativos observado e simulado de R_n, H, LE e F_C em função do tempo. As Figuras 36 a 40 apresentam os fluxos observado e simulado de R_n, PAR_{in}, H, LE e NEE/F_C em função do tempo, para um período de aproximadamente dez dias, em quatro épocas do ano. No caso deste sítio, os critérios de filtragem, principalmente o fechamento do balanço de energia, eliminaram muitos dados que seriam utilizados na análise, conforme evidenciado pelas linhas horizontais na Figura 35, bem como pela ausência de pontos na maioria dos dias nas Figuras 30, 31 e 32.

Embora a elevada fração de dados eliminados limite a análise, R_n, PAR_{in}, H e LE são bem simulados e sua variabilidade horária é bem representada (Figs. 34 a 39).

O IBIS simula bem o fluxo de gás carbônico, mesmo com os dados observados sendo de F_C e os dados simulados pelo modelo sendo de NEE. Isto pode ser observado nos gráficos de dispersão (Fig. 34d), cumulativo (Fig. 35d) e da variabilidade do fluxo em função do tempo (Fig. 40).

3.2.5. Discussão conjunta

Com os parâmetros iniciais, o modelo simula bem R_n, PAR_{in} e PAR_{out} para todos os sítios calibrados. G é superestimado, enquanto H, LE, NEE e F_C não são bem simulados pelo modelo, exceto no caso da Flona do Tapajós km 67.

O novo conjunto de parâmetros do modelo IBIS, ajustados para cada sítio, produz melhores resultados na determinação de H, LE, NEE e F_C. O modelo simula e representa bem a variabilidade horária de R_n, PAR_{in}, PAR_{out}, H, LE, NEE e F_C, exceto no caso de NEE para a

Reserva do Cuieiras e em valores extremos de H e LE. A estimativa de G, entretanto não melhorou com a calibração.

Os melhores resultados de R_n foram observados na Reserva do Cuieiras km 34 e na Rebio Jaru, devido ao fato destes sítios possuírem observações de L_{in}, enquanto nos sítios da Flona do Tapajós foi necessário estimar.

Os melhores ajustes de H, LE e NEE foram observados no sítio da Flona do Tapajós km 67. Existem duas razões possíveis para explicar este resultado: (a) a análise prévia de sensibilidade, que foi feita apenas para este sítio, e (b) os dados deste sítio foram submetidos a um pós-processamento mais cuidadoso do que os dados dos demais sítios, sendo esta última hipótese mais provável.

As Reservas do Cuieiras km 34 e Tapajós km 67 obtiveram um melhor ajuste com os parâmetros que tendiam a reduzir g_s ($V_{máx}$, m e β_2 com valores baixos), tendo ambos superestimado LE em todo o período de simulação (Figs. 19c e 27c). Por outro lado, os sítios do Tapajós km 83 e Rebio Jaru obtiveram um melhor ajuste com valores que tendiam a aumentar g_s ($V_{máx}$, m e β_2 com valores altos), tendo ou ajustado corretamente (Tapajós km 83) ou subestimado (Jaru) LE em todo o período.

Nota-se também que é contraproducente preencher falhas em períodos relativamente longos (>15 dias). Este procedimento foi tentado duas vezes (Tapajós km 83 e Cuieiras km 34), mas houve uma considerável divergência dos valores simulados e observados de LE e NEE após a longa falha (Figs. 10c, d e 27d).

3.3 Teste da calibração em outros sítios

As Tabelas 9 a 12 apresentam as estatísticas ρ, α, ε e RMSE das simulações que testam os melhores parâmetros ajustados à série de dados de cada sítio nos demais sítios. Cada simulação é denominada pela letra "S", seguida pelo nome do sítio-base, seguido pela

letra "P" e pelo sítio usado no ajuste dos parâmetros $V_{máx}$, β_2, C_{HS} e m. A configuração do sítio-base inclui todos os parâmetros daquele sítio (exceto $V_{máx}$, β_2, C_{HS} e m) e sua série de dados meteorológicos de entrada. Assim, a Tabela 9 mostra os coeficientes ρ e α, bem como os erros ε e RMSE entre os dados observados e os simulados, usando os dados de entrada e demais parâmetros do sítio Tapajós km 83 e o conjunto de parâmetros $V_{máx}$, β_2, C_{HS} e m ajustados para todos os sítios, conforme Tabela 4. Estas estatísticas correspondem ao uso dos parâmetros obtidos na calibração do sítio Tapajós km 83 no próprio sítio (Skm83-Pkm83), aos parâmetros obtidos na melhor calibração do sítio Tapajós km 67 usada no sítio base Tapajós km 83 (Skm83-Pkm67), parâmetros da calibração do sítio do Cuieiras utilizada no km 83 (Skm83-Pkm34) e parâmetros da calibração do sítio da Rebio Jaru utilizada no km 83 (Skm83-PJaru). As Tabelas 10, 11 e 12 são equivalentes à Tabela 9, embora usando as séries de dados de entrada e demais parâmetros dos sítios base da Flona do Tapajós km 67, Reserva do Cuieiras km 34 e Rebio Jaru, respectivamente.

Nas Tabelas 9 a 12 observa-se que praticamente não existem variações nos valores ρ, α, ε e RMSE para R_n, PAR_{in}, PAR_{out} e G. As diferenças mais significativas ocorrem na simulação de H, LE e NEE. Em geral, considerando-se as estatísticas ρ, α, ε e RMSE conjuntamente, a simulação que apresentou melhor ajuste foi aquela em que os parâmetros otimizados para a sua própria série foram usados. Em determinados casos, algumas estatísticas (como ρ na Tabela 9) foram ligeiramente melhores quando utilizou-se o parâmetro obtido na calibração contra dados de outro sítio; entretanto ocorreu grande prejuízo no erro relativo médio.

Foi observado na Tabela 4 (e discutido na Seção 3.2) que os parâmetros ajustados às séries do par de sítios Flona do Tapajós km 83 e Rebio Jaru foram semelhantes entre si, o mesmo ocorrendo com os parâmetros ajustados às séries do par de sítios Flona do Tapajós km 67 e Reserva Cuieiras km 34. Observa-se, nas Tabelas 9 a 12, que as simulações utilizando

parâmetros obtidos no outro sítio do par (Skm83-PJaru, SJaru-Pkm83, Skm67-Pkm34 e Skm34-Pkm67) também ajustaram-se relativamente bem aos dados observados. Por outro lado, as simulações usando parâmetros obtidos em um dos sítios do outro par (Skm83-Pkm67, Skm83-Pkm34, etc.) apresentaram um ajuste relativamente ruim aos dados observados.

Esta análise indica que não existe um conjunto único de parâmetros β_2, $V_{máx}$, m e C_{HS} que otimize o ajuste dos resultados simulados pelo modelo a todos os sítios de floresta tropical. Embora o par km83/Jaru tenha otimizado os parâmetros que tenderam a aumentar g_s, forçando aumentar LE simulado, assim como o par km67/km34 otimizou os parâmetros que tenderam a reduzir g_s (Seção 3.2.5), não está clara a razão pela qual o modelo comportou-se de maneira diferente nos dois casos. Discute-se a seguir quatro possibilidades que poderiam explicar este comportamento:

(a) Erros na parametrização das propriedades físicas do solo. Os modelos que incluem transporte de calor e umidade no solo necessitam de informações sobre as propriedades físicas do solo, tais como a condutividade e difusividade térmica, capacidade térmica do solo, porosidade, condutividade hidráulica e outros parâmetros relacionados ao transporte de calor e ao movimento de água no solo. No presente trabalho, em razão da indisponibilidade de parâmetros medidos localmente em todos os sítios, foram utilizadas relações empíricas que obtinham esses parâmetros em função da textura do solo. Essas relações fornecem apenas estimativas aproximadas das propriedades físicas do solo, sendo que o erro na estimativa desses parâmetros deve propagar-se para a estimativa dos fluxos. Esta hipótese se baseia no argumento que eventuais erros na estimativa das propriedades físicas do solo seriam compensados pelos parâmetros sob calibração. Entretanto, com os dados disponíveis, não é possível quantificar este erro.

(b) Composição e estrutura da vegetação consideravelmente diferente entre os sítios. Apesar da atual indisponibilidade de estudos conclusivos, espera-se que um vasto ecossistema,

como a floresta tropical Amazônica, apresente composição e estrutura espacialmente variável (Rocha, 2004). As diferenças podem se manifestar, por exemplo, na altura, composição e estrutura da cobertura vegetal, perfil do sistema radicular, biomassa, dentre outros, afetando assim, os fluxos de energia e massa. O IBIS ainda não representa algumas dessas variações na estrutura.

(c) Tendências sistemáticas no projeto e operação dos sítios experimentais. Cada grupo de pesquisadores utiliza procedimentos individuais para produzir os dados do sítio em questão, desde a seleção, instalação e calibração dos instrumentos até a aquisição e pós-processamento dos dados. A diferença na operacionalidade de cada sítio experimental pode produzir disparidades significativas entre os dados coletados individualmente em cada sítio.

(d) Incertezas nas próprias observações dos fluxos turbulentos (H, LE e NEE) devidas aos critérios de filtragem pouco rígidos ($\delta = 0,4$) adotados neste trabalho. A energia que entra e sai de um determinado sistema deve ser conservada; entretanto, as medições dos fluxos turbulentos de energia nem sempre se ajustam às medições de energia disponível. Além disso, em condições de baixa turbulência, os fluxos de CO_2 noturnos podem ser penalizados. No presente trabalho os fluxos turbulentos foram submetidos a dois critérios de filtragem, numa tentativa de minimizar as incertezas pertinentes à estimativa desses fluxos. Porém, a tolerância dos critérios da velocidade de atrito (u^*_0) e do fechamento do balanço de energia (δ) pode ter sido baixa, devido à grande quantidade de dados eliminados à medida que os limiares tornavam-se mais restritivos. Acredita-se que quanto mais rígido o critério de filtragem (u^*_0 maior e δ menor), mais consistentes serão os dados; entretanto, a utilização de critérios muito rígidos inviabilizaria este estudo.

Tabela 4- Parâmetros não calibrados (Inicial) e parâmetros calibrados para cada sítio.

		β_2	$V_{máx}$ (μ mol m^{-2} s^{-1})	m	C_{HS} (J m^{-2} °C^{-1})	C_{HU} (J m^{-2} °C^{-1})
Inicial		0,975	65	10	$2,109.10^5$	$8,436.10^3$
Calibrado	km 83	0,997	120	11	$0,325.10^5$	$2,109.10^3$
	km 67	0,980	65	9	$2,109.10^5$	$2,109.10^3$
	km 34	0,985	70	9	$0,263.10^5$	$2,109.10^3$
	Rebio Jaru	0,997	120	10	$0,527.10^5$	$2,109.10^3$

Tabela 5- Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio da Flona do Tapajós km 83. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais.

		R_n (W m^{-2})	PAR_{in} (μmol m^{-2} s^{-1})	PAR_{out} (μmol m^{-2} s^{-1})	G (W m^{-2})	H (W m^{-2})	LE (W m^{-2})	NEE (kg C ha^{-1} hr^{-1})
Inicial	ρ	0,889	0,888	0,896	0,868	0,227	0,707	0,632
	α	0,888	0,881	0,863	1,572	0,127	0,459	0,389
	ε	-0,05	-0,01	-0,04	-0,21	0,53	-0,22	0,33
	RMSE	96,49	239,45	6,52	20,73	61,93	118,96	4,41
Calibrado	ρ	0,888	0,888	0,896	0,825	0,644	0,806	0,722
	α	0,876	0,881	0,824	1,755	0,527	0,735	0,616
	ε	-0,02	0,00	-0,08	-1,77	0,07	0,06	0,42
	RMSE	95,81	239,45	6,48	10,95	45,84	98,58	4,02

Tabela 6- Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio da Flona do Tapajós km 67. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais.

		R_n ($W\ m^{-2}$)	PAR_{in} ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	PAR_{out} ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	H ($W\ m^{-2}$)	LE ($W\ m^{-2}$)	NEE ($kg\ C\ ha^{-1}\ hr^{-1}$)
Inicial	ρ	0,899	0,906	0,909	0,793	0,855	0,540
	α	0,812	0,826	0,801	0,557	0,790	0,419
	ε	0,11	0,14	0,17	0,14	0,07	-0,99
	RMSE	100,33	245,81	6,75	30,60	52,43	5,70
Calibrado	ρ	0,858	0,904	0,907	0,731	0,851	0,939
	α	1,020	1,009	1,049	0,945	0,931	0,948
	ε	0,11	0,14	0,17	0,11	0,11	-0,01
	RMSE	100,00	245,81	6,67	33,07	52,43	1,13

Tabela 7- Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio do Cuieiras km 34. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais.

		R_n (W m^{-2})	PAR_{in} (μmol m^{-2} s^{-1})	PAR_{out} (μmol m^{-2} s^{-1})	H (W m^{-2})	LE (W m^{-2})	NEE (kg C ha^{-1} hr^{-1})
Inicial	ρ	0,945	0,933	0,935	0,331	0,827	0,390
	α	0,951	0,955	0,875	0,125	0,616	0,310
	ε	-0,10	0,00	0,06	0,00	0,04	-2,16
	RMSE	79,77	197,33	5,27	58,70	87,87	6,60
Calibrado	ρ	0,944	0,933	0,935	0,702	0,862	0,406
	α	0,907	0,955	0,975	0,606	0,795	0,317
	ε	-0,08	0,00	0,06	-0,04	0,08	0,37
	RMSE	78,84	197,33	5,27	45,40	79,34	4,20

Tabela 8- Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração para o sítio da Rebio Jaru. As unidades referem-se apenas ao RMSE, pois ρ, α e ε são adimensionais.

		R_n (W m^{-2})	PAR_{in} (μmol m^{-2} s^{-1})	H (W m^{-2})	LE (W m^{-2})	F_C (kg C ha^{-1} hr^{-1})
Inicial	ρ	0,995	0,998	0,341	0,680	0,613
	α	1,001	0,995	0,198	0,449	0,395
	ε	-0,05	-0,01	-0,06	-0,42	-0,39
	RMSE	25,44	38,13	81,51	117,20	4,24
Calibrado	ρ	0,995	0,998	0,651	0,771	0,568
	α	0,975	0,995	0,503	0,850	0,468
	ε	0,01	-0,01	-0,04	-0,06	-0,06
	RMSE	24,66	38,13	64,67	100,70	4,58

Tabela 9- Coeficientes de correlação (ρ), inclinação (α), erro relativo médio (ε) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados observados e simulados, para as melhores calibrações individuais repetidas para o sítio da Flona do Tapajós km 83.

	R_n	PAR_{in}	PAR_{out}	G	H	LE	NEE
Coef.Correlação (ρ)							
Skm83 - Pkm83	0,888	0,888	0,896	0,825	0,644	0,806	0,722
Skm83 - Pkm67	0,888	0,888	0,896	0,859	0,359	0,728	0,656
Skm83 - Pkm34	0,885	0,888	0,896	0,819	0,715	0,770	0,669
Skm83 - PJaru	0,888	0,888	0,896	0,854	0,672	0,809	0,730
Coef. Inclinação (α)							
Skm83-Pkm83	0,876	0,881	0,824	1,755	0,527	0,735	0,616
Skm83-Pkm67	0,887	0,881	0,824	1,377	0,198	0,467	0,402
Skm83-Pkm34	0,861	0,881	0,824	1,886	0,855	0,578	0,411
Skm83-PJaru	0,877	0,881	0,824	1,780	0,503	0,699	0,617
Erro relativo médio (ε)							
Skm83-Pkm83	-0,02	-0,00	-0,08	-1,77	0,07	0,06	0,42
Skm83-Pkm67	-0,05	-0,01	-0,08	-1,74	0,57	-0,21	0,41
Skm83-Pkm34	-0,04	-0,01	-0,08	-1,88	0,85	-0,14	0,47
Skm83-PJaru	-0,03	-0,01	-0,08	-1,76	0,16	0,02	1,24
RMSE							
Skm83-Pkm83	95,81	239,45	6,48	10,95	45,84	98,58	4,02
Skm83-Pkm67	96,51	239,45	6,48	7,08	57,89	115,83	4,31
Skm83-Pkm34	96,92	239,45	6,48	12,26	55,04	105,53	4,25
Skm83-PJaru	96,16	239,45	6,48	10,32	43,64	96,56	4,17

Tabela 10- Igual à Tabela 9, só que para o sítio da Flona do Tapajós km 67.

	R_n	PAR_{in}	H	LE	NEE
Coef.Correlação (ρ)					
Skm67-Pkm67	0,858	0,904	0,731	0,851	0,939
Skm67-Pkm83	0,894	0,904	0,312	0,733	0,762
Skm67-Pkm34	0,895	0,904	0,530	0,858	0,932
Skm67-PJaru	0,895	0,904	0,346	0,735	0,763
Coef. Inclinação (α)					
Skm67-Pkm67	1,020	1,009	0,945	0,931	0,948
Skm67-Pkm83	1,001	1,009	0,492	1,091	0,977
Skm67-Pkm34	0,982	1,009	1,193	1,075	0,923
Skm67-PJaru	1,006	1,009	0,486	1,051	0,974
Erro relativo médio (ε)					
Skm67-Pkm67	0,11	0,14	0,11	0,11	-0,01
Skm67-Pkm83	0,15	0,14	-0,17	0,43	0,69
Skm67-Pkm34	0,12	0,14	0,10	0,19	0,00
Skm67-PJaru	0,15	0,14	-0,16	0,41	0,71
RMSE					
Skm67-Pkm67	100,00	245,81	33,07	52,43	1,13
Skm67-Pkm83	100,63	245,81	58,88	96,67	2,73
Skm67-Pkm34	98,00	245,81	70,79	59,58	1,18
Skm67-PJaru	100,71	245,81	52,72	92,49	2,72

Tabela 11- Igual à Tabela 9, só que para o sítio da Reserva do Cuieiras.

	R_n	PAR_{in}	PAR_{out}	H	LE	NEE
Coef.Correlação (ρ)						
Skm34-Pkm34	0,944	0,933	0,935	0,702	0,862	0,406
Skm34-Pkm83	0,944	0,933	0,935	0,667	0,865	0,398
Skm34-Pkm67	0,945	0,933	0,935	0,429	0,841	0,399
Skm34-PJaru	0,944	0,933	0,935	0,687	0,869	0,399
Coef. Inclinação (α)						
Skm34-Pkm34	0,907	0,955	0,975	0,606	0,795	0,317
Skm34-Pkm83	0,922	0,955	0,975	0,403	0,919	0,429
Skm34-Pkm67	0,945	0,955	0,975	0,159	0,625	0,317
Skm34-PJaru	0,927	0,955	0,975	0,389	0,875	0,426
Erro relativo médio (ε)						
Skm34-Pkm34	-0,08	0,00	0,06	-0,04	0,08	0,37
Skm34-Pkm83	-0,06	0,00	0,06	-0,41	0,21	0,97
Skm34-Pkm67	-0,09	0,00	0,06	-0,02	0,05	0,29
Skm34-PJaru	-0,07	0,00	0,06	-0,35	0,18	0,91
RMSE						
Skm34-Pkm34	78,84	197,33	5,27	45,40	79,34	4,20
Skm34-Pkm83	78,82	197,33	5,27	47,74	85,98	4,91
Skm34-Pkm67	79,60	197,33	5,27	56,24	85,25	4,24
Skm34-PJaru	78,78	197,33	5,27	46,72	81,36	4,87

Tabela 12- Igual à Tabela 9, só que para Rebio Jaru.

	R_n	PAR_{in}	H	LE	NEE
Coef.Correlação (ρ)					
SJaru-PJaru	0,995	0,998	0,651	0,771	0,568
SJaru-Pkm83	0,995	0,998	0,674	0,769	0,566
SJaru-Pkm67	0,995	0,998	0,459	0,685	0,611
SJaru-Pkm34	0,944	0,998	0,714	0,727	0,612
Coef. Inclinação (α)					
SJaru-PJaru	0,975	0,995	0,503	0,850	0,468
SJaru-Pkm83	0,966	0,995	0,560	0,912	0,469
SJaru-Pkm67	0,944	0,995	0,292	0,447	0,383
SJaru-Pkm34	0,938	0,995	0,941	0,607	0,380
Erro relativo médio (ε)					
SJaru-PJaru	0,01	-0,01	-0,04	-0,06	-0,06
SJaru-Pkm83	0,03	-0,01	-0,04	-0,01	-0,04
SJaru-Pkm67	-0,04	-0,01	0,06	-0,37	-0,40
SJaru-Pkm34	0,00	-0,01	0,48	-0,26	-0,40
RMSE					
SJaru-PJaru	24,66	38,13	64,67	100,70	4,58
SJaru-Pkm83	25,91	38,13	63,47	106,50	4,59
SJaru-Pkm67	26,54	38,13	76,18	116,24	4,25
SJaru-Pkm34	30,91	38,13	82,81	105,08	4,25

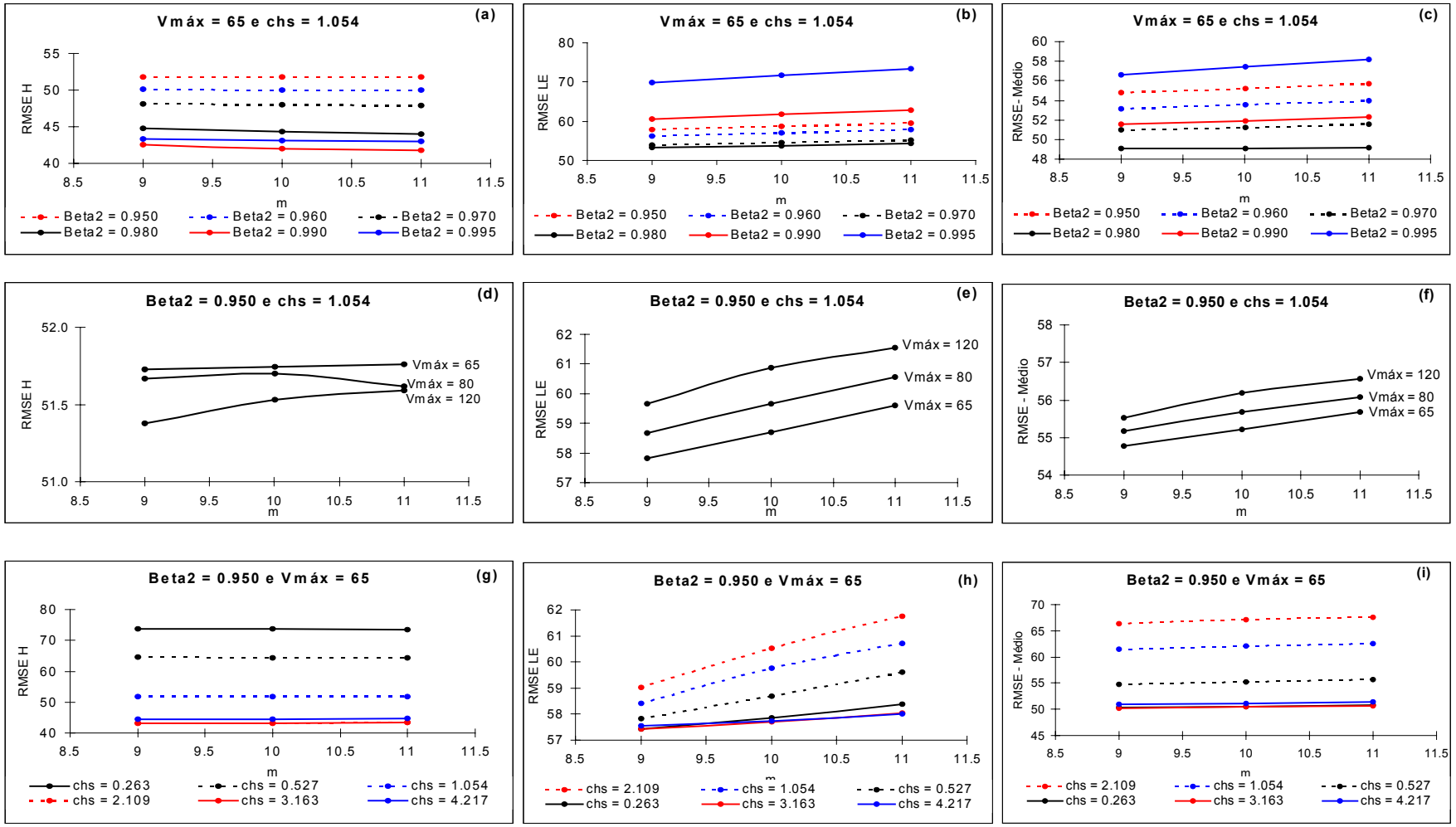

Figura 5- RMSE para o fluxo de calor sensível ($RMSE_H$), fluxo de calor latente ($RMSE_{LE}$) e valor médio ($RMSE_{H-LE}$) em função do parâmetro *m*, para Flona do Tapajós km 67. $V_{máx}$ em µmol m^{-2} s^{-1}, C_{HS} em 10^5 J m^{-2} °C^{-1}.

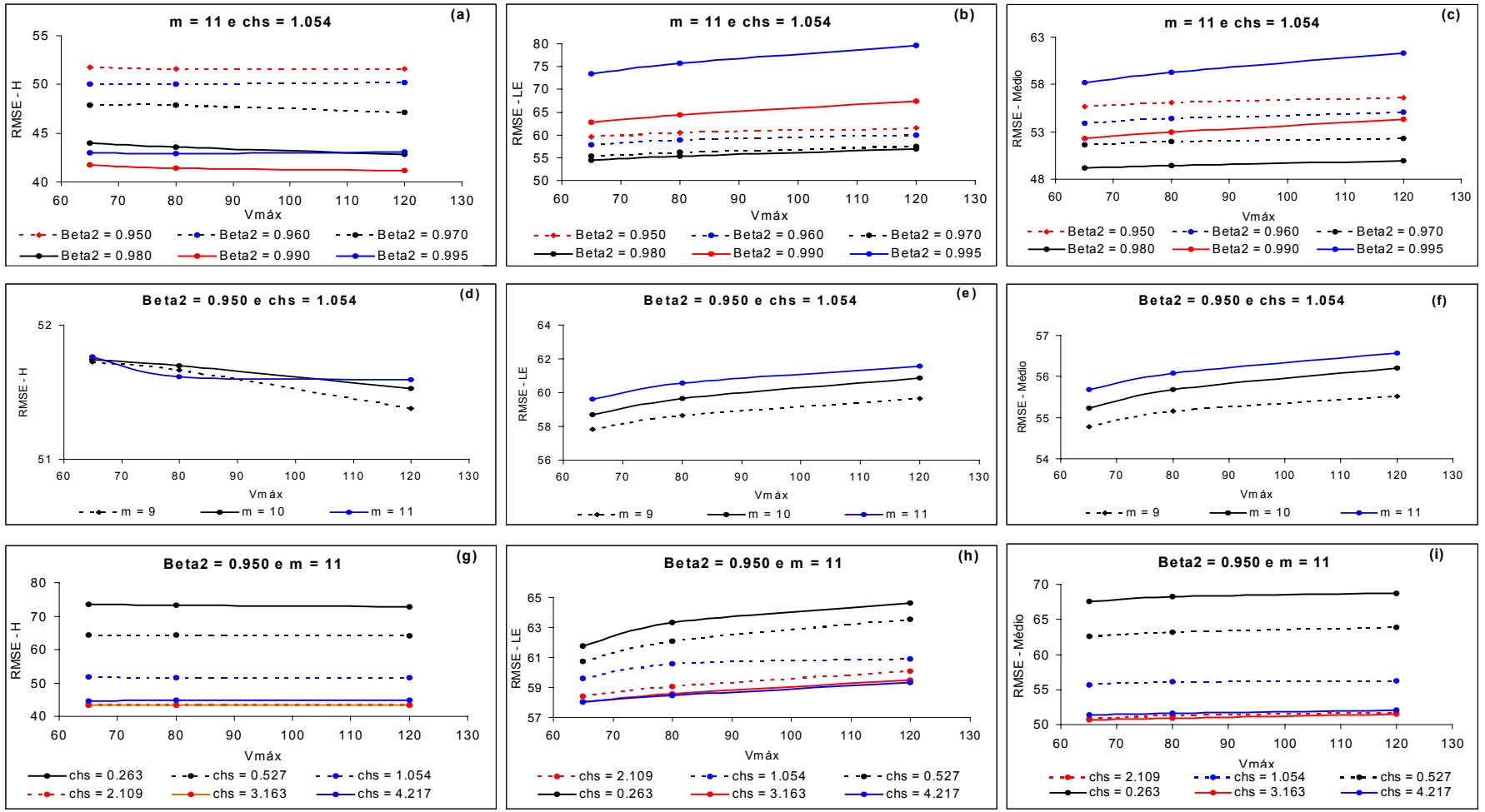

Figura 6- Igual à Figura 4, mas em função de $V_{máx}$.

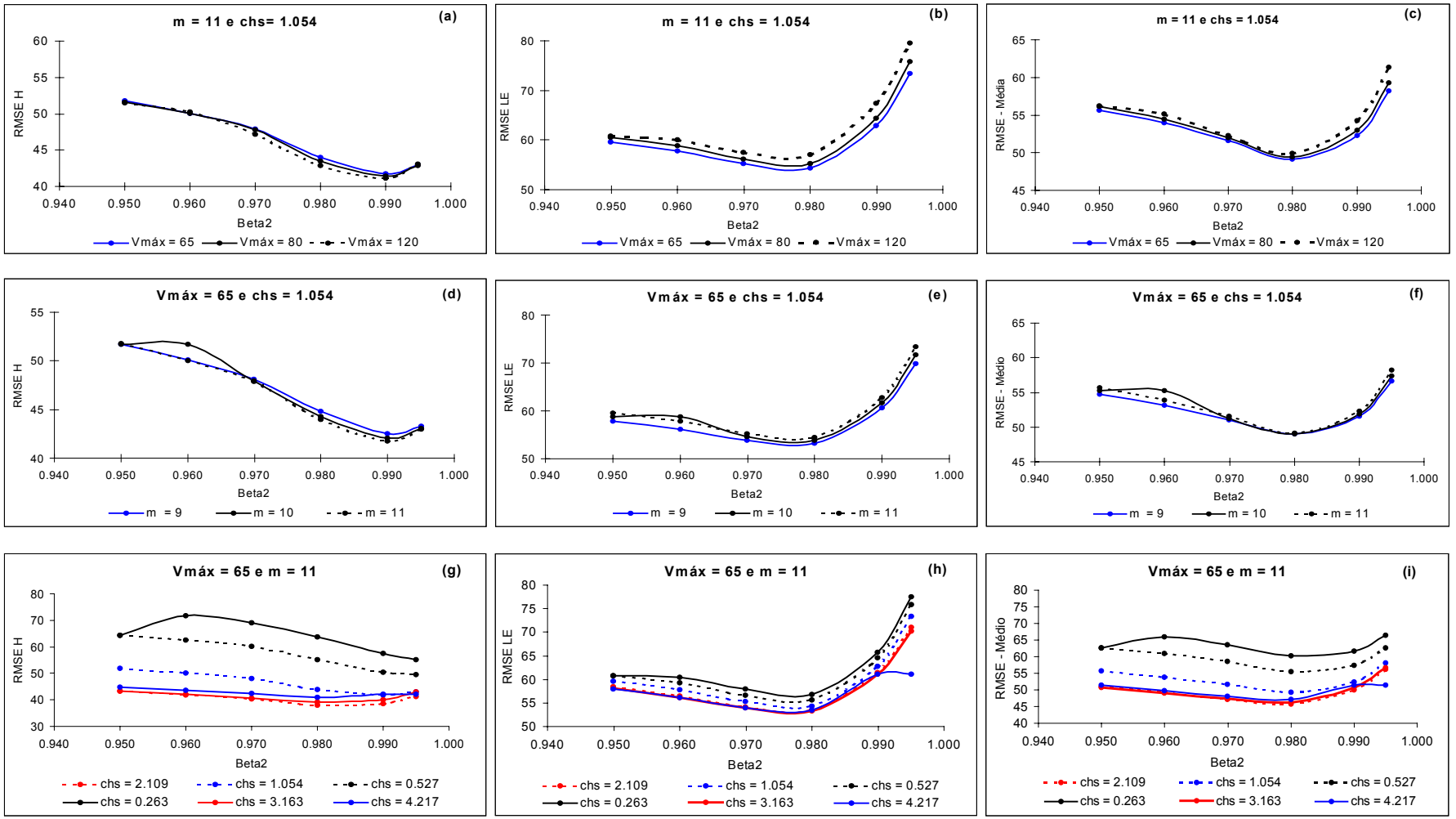

Figura 7- Igual à Figura 4, mas em função de β_2.

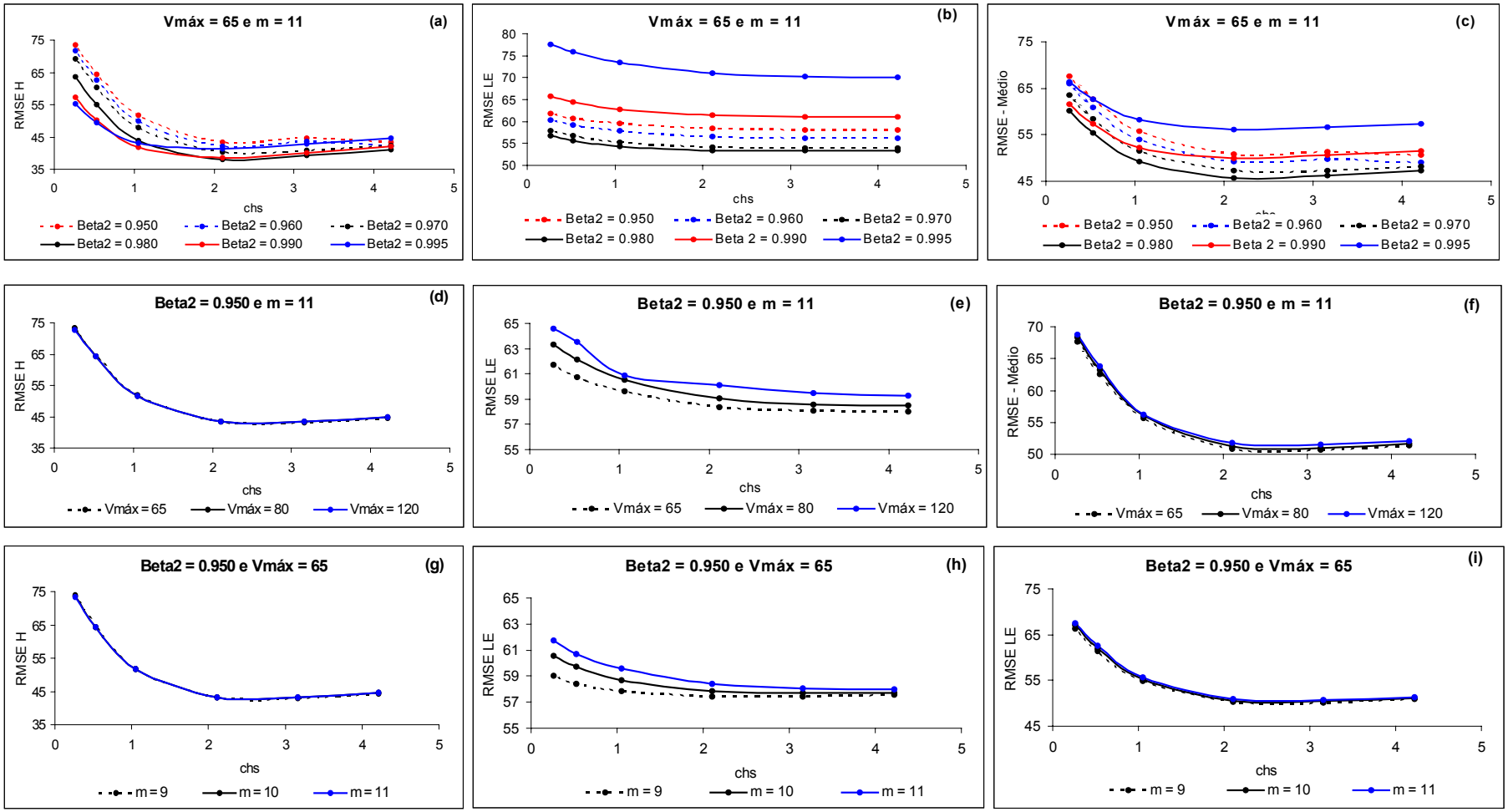

Figura 8- Igual à Figura 4, mas em função de C_{HS}.

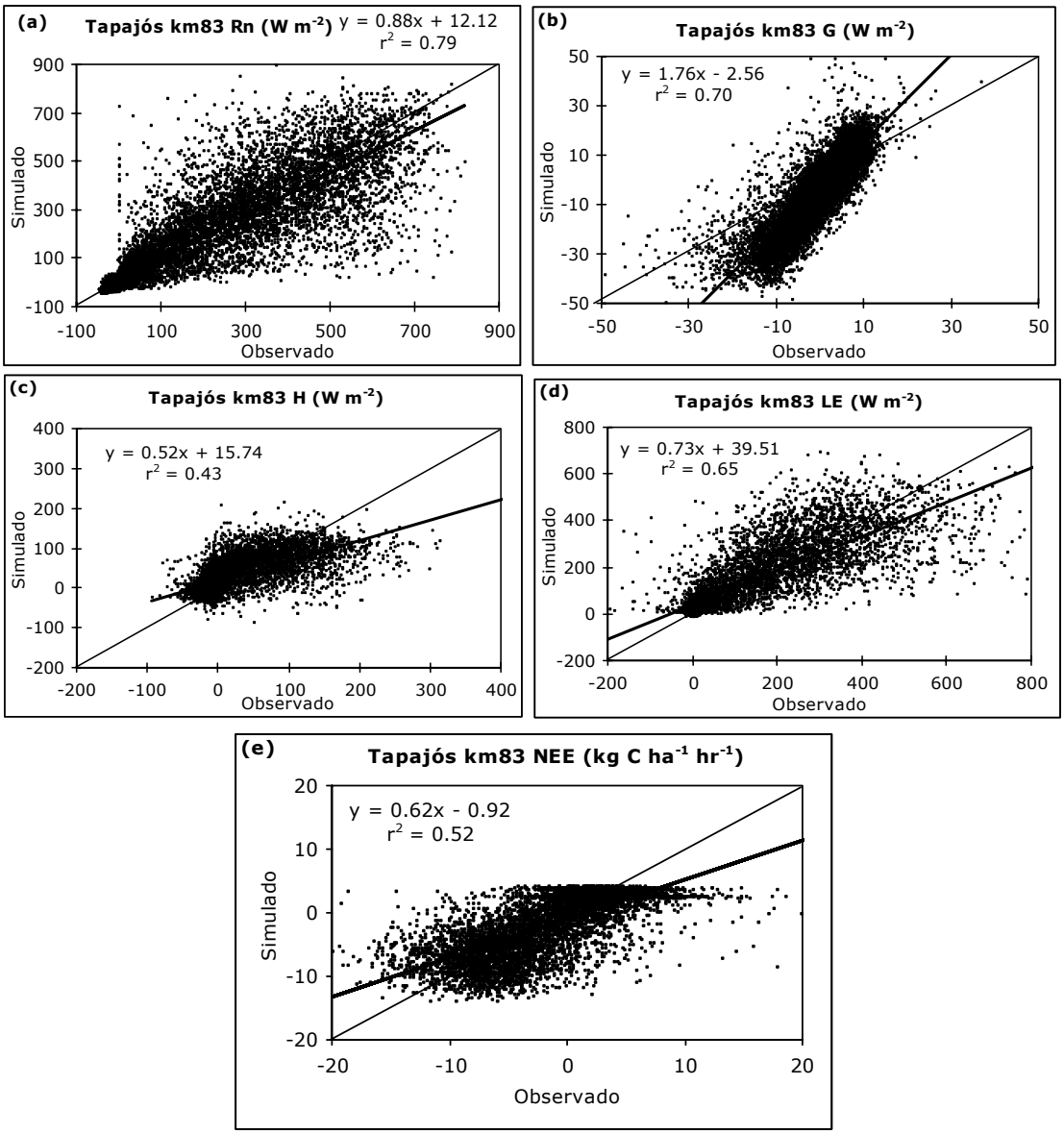

Figura 9- Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE), mostrando ainda a reta 1:1 e a reta de regressão, com seus coeficientes, para Tapajós km 83.

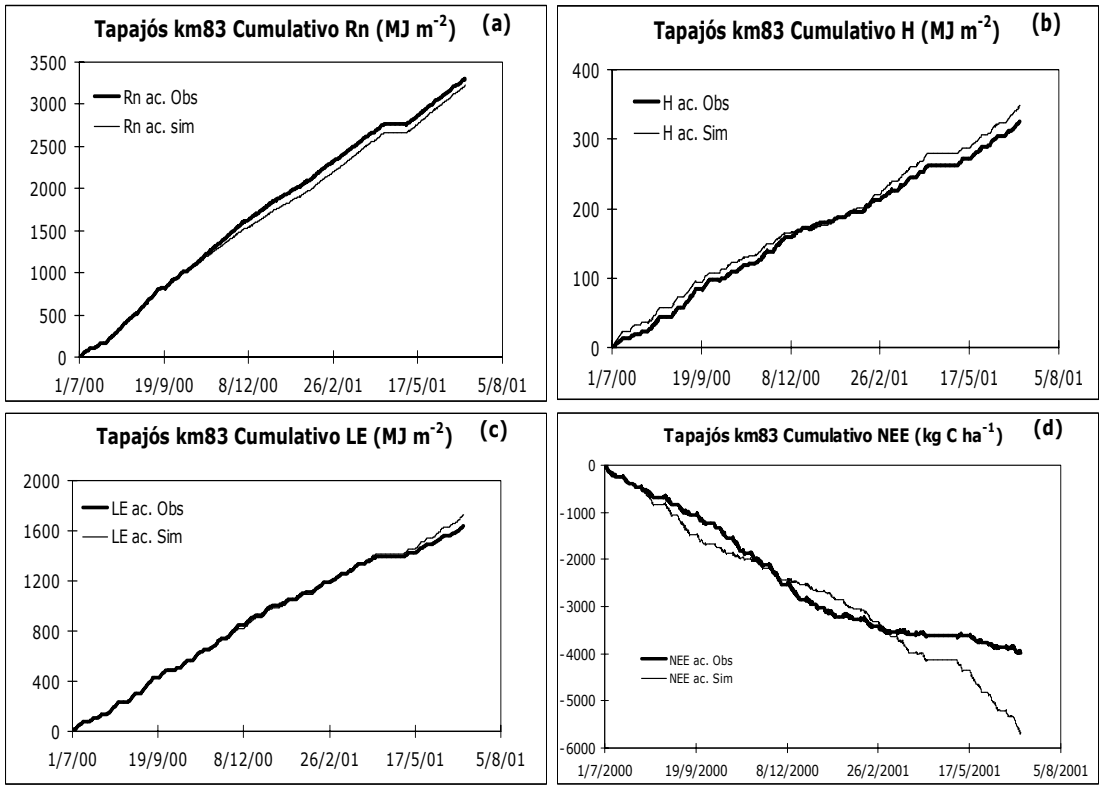

Figura 10- Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE para Tapajós km 83.

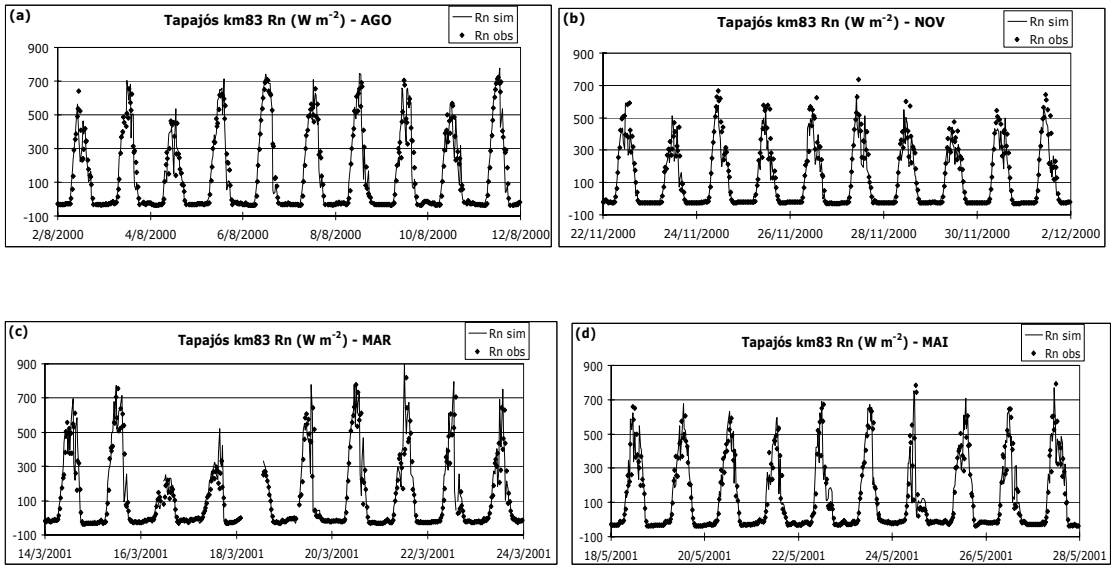

Figura 11- Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de agosto e novembro de 2000 e março e maio de 2001, para o sítio do Tapajós km 83. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados.

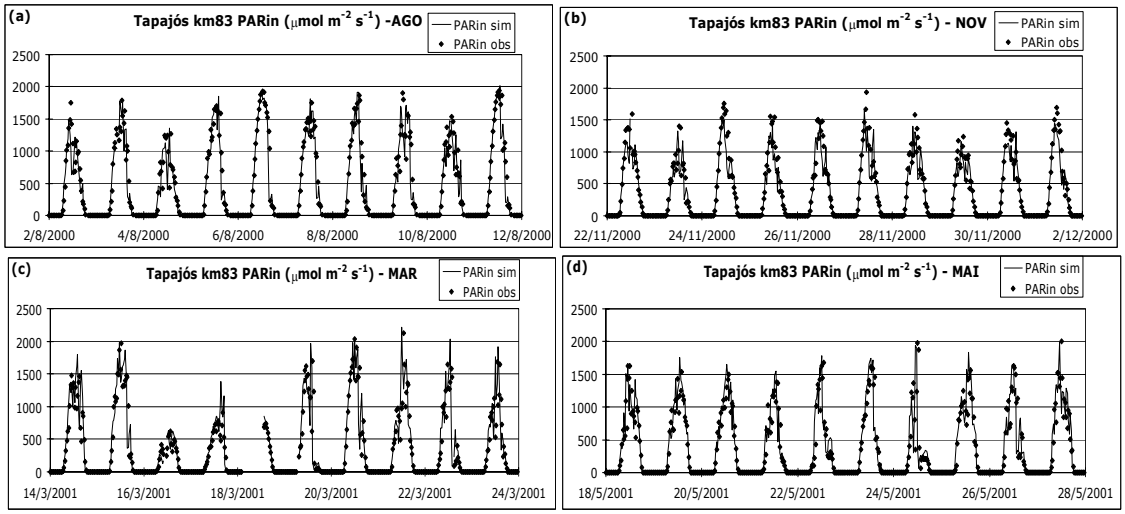

Figura 12- Igual à Figura 11, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol m^{-2} s^{-1}).

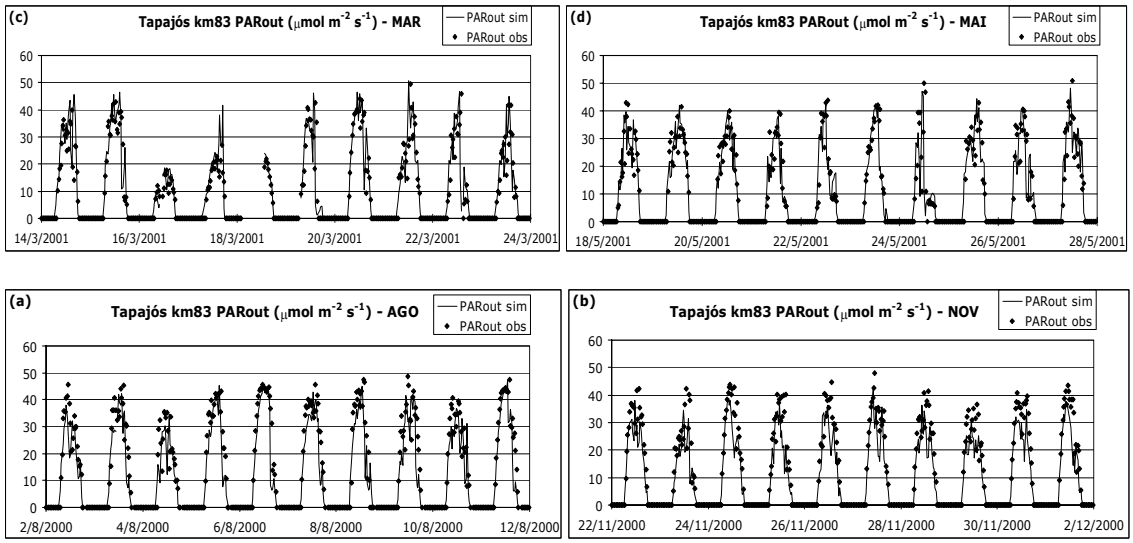

Figura 13- Igual à Figura 11, para radiação fotossinteticamente ativa refletida (μmol m^{-2} s^{-1}).

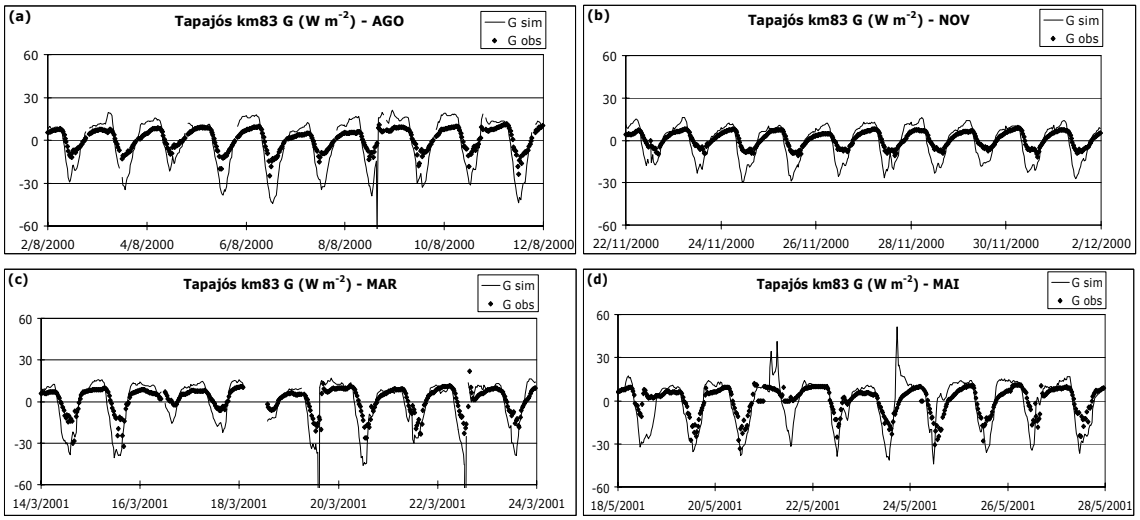

Figura 14- Igual à Figura 11, mas para fluxo de calor no solo (W m^{-2}).

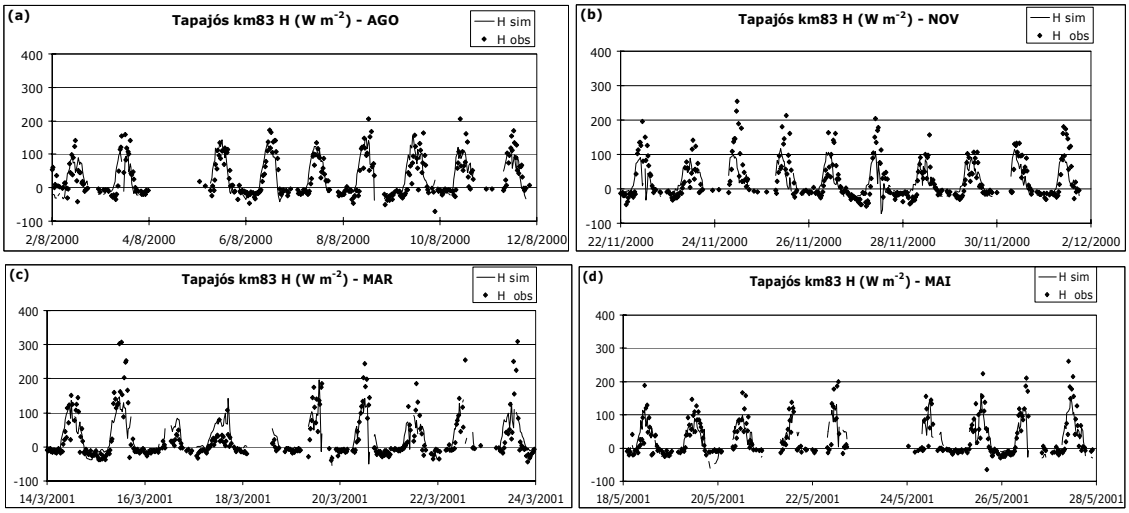

Figura 15- Igual à Figura 11, mas para fluxo de calor sensível (W m^{-2}).

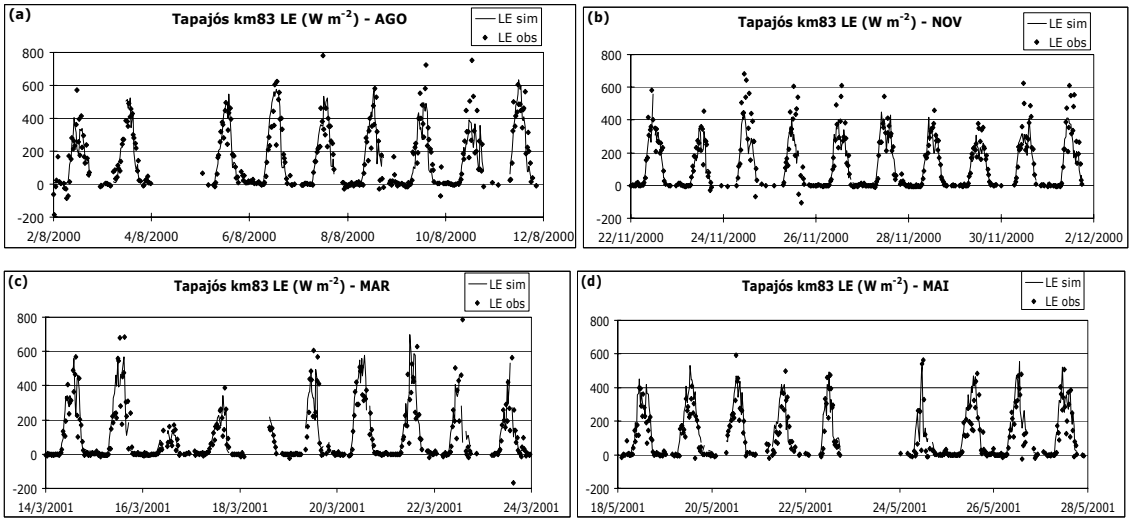

Figura 16- Igual à Figura 11, mas para fluxo de calor latente (W m^{-2}).

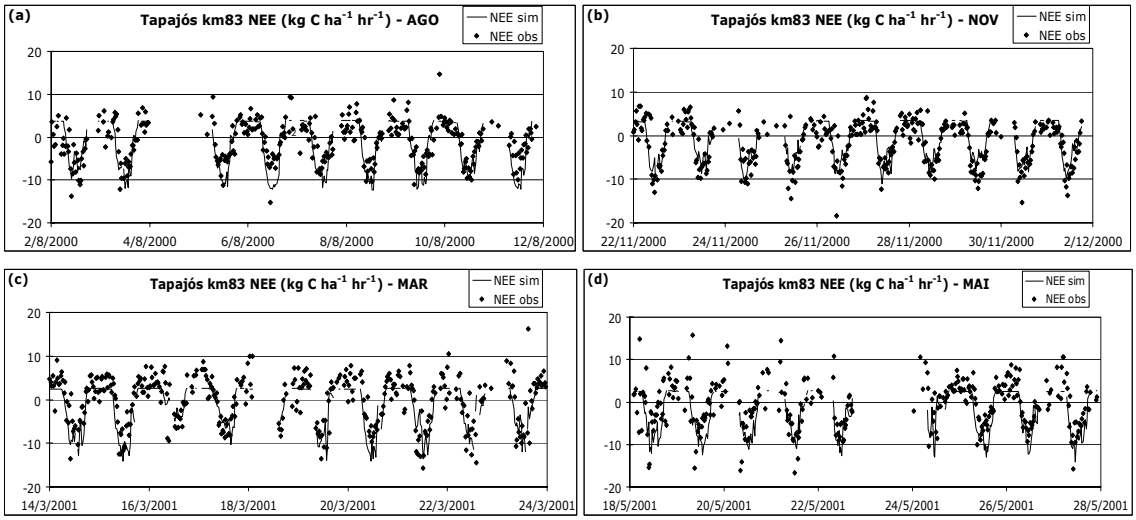

Figura 17- Igual à Figura 11, mas para troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1}).

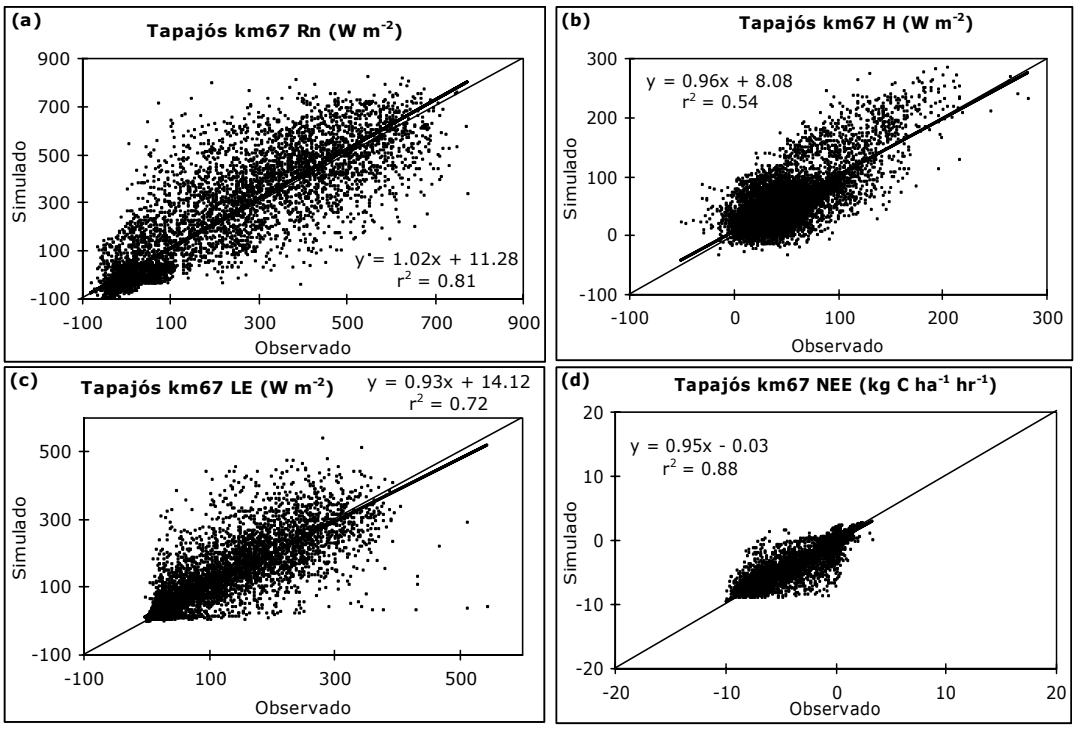

Figura 18- Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE), mostrando ainda a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes, para Tapajós km 67.

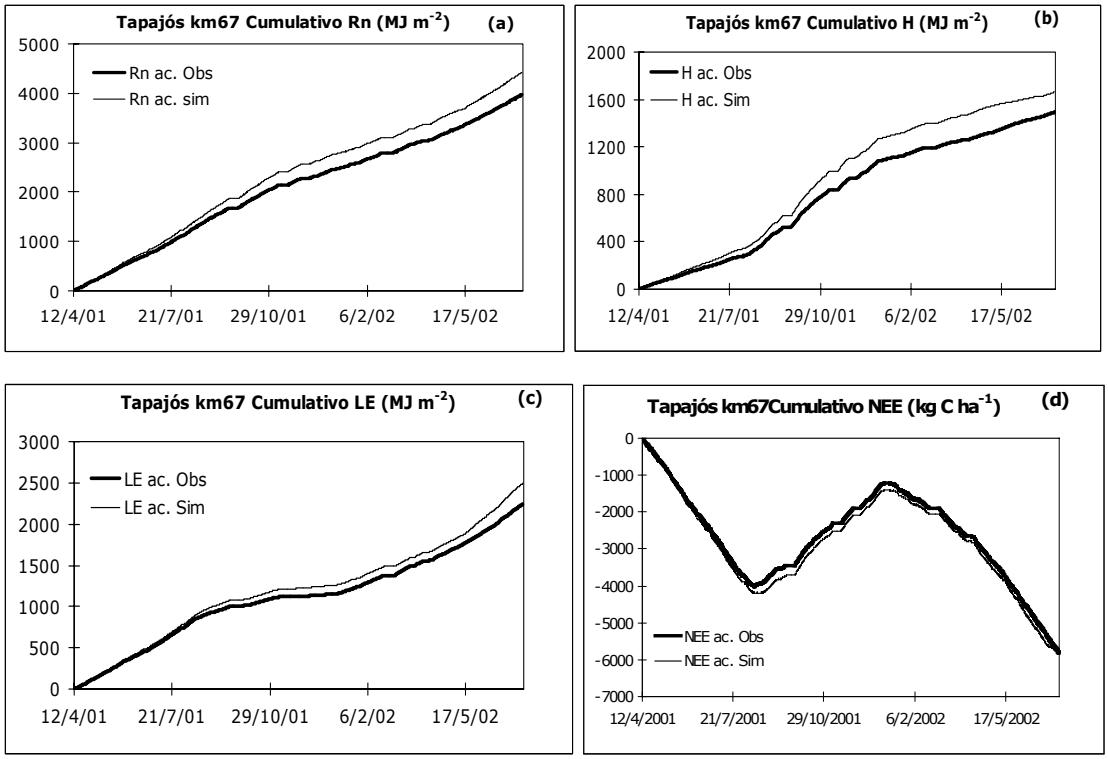

Figura 19- Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE, para Tapajós km 67.

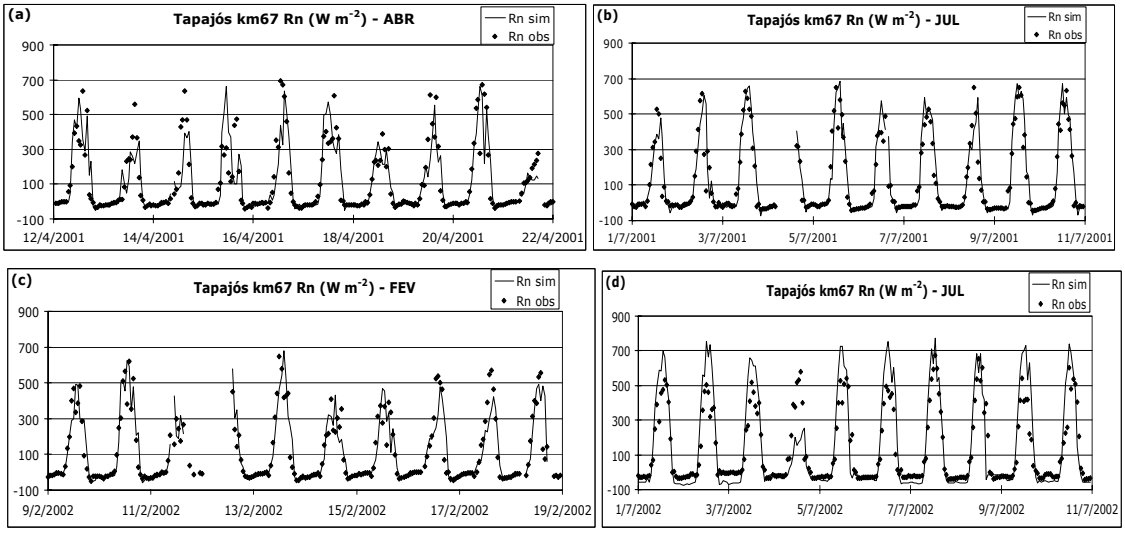

Figura 20- Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de abril e julho de 2001 e fevereiro e julho de 2002, para o sítio do Tapajós km 67. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados.

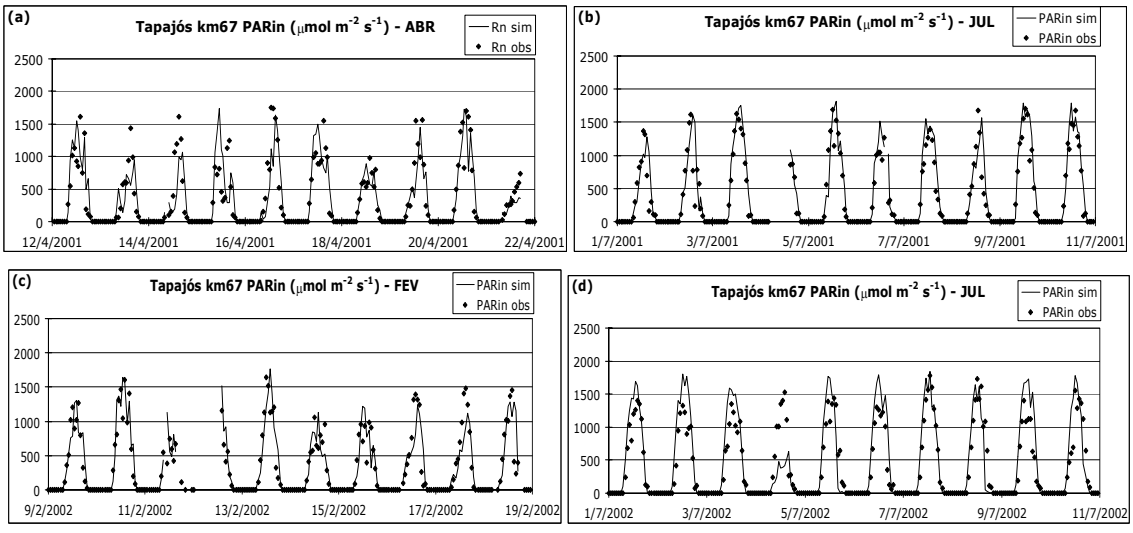

Figura 21- Igual à Figura 20, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol m^{-2} s^{-1}).

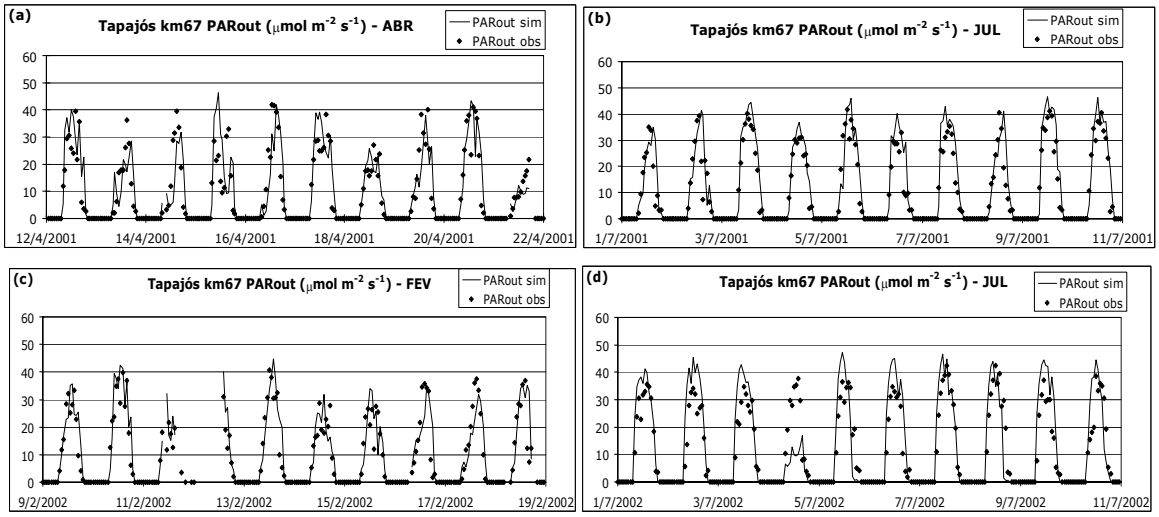

Figura 22- Igual à Figura 20, para radiação fotossinteticamente ativa refletida (μmol m^{-2} s^{-1}).

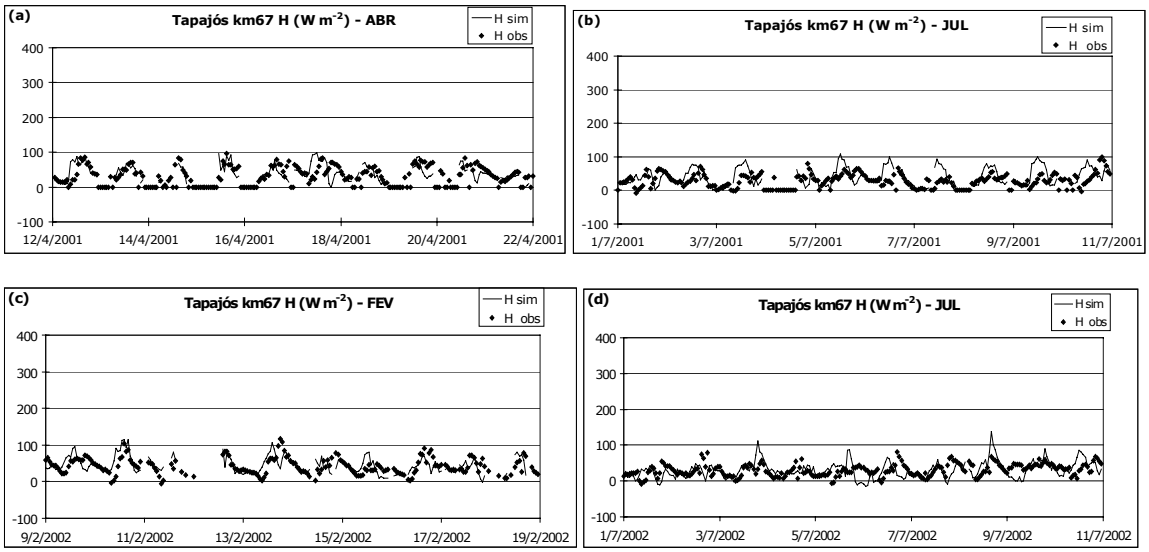

Figura 23- Igual à Figura 20, mas para fluxo de calor sensível (W m^{-2}).

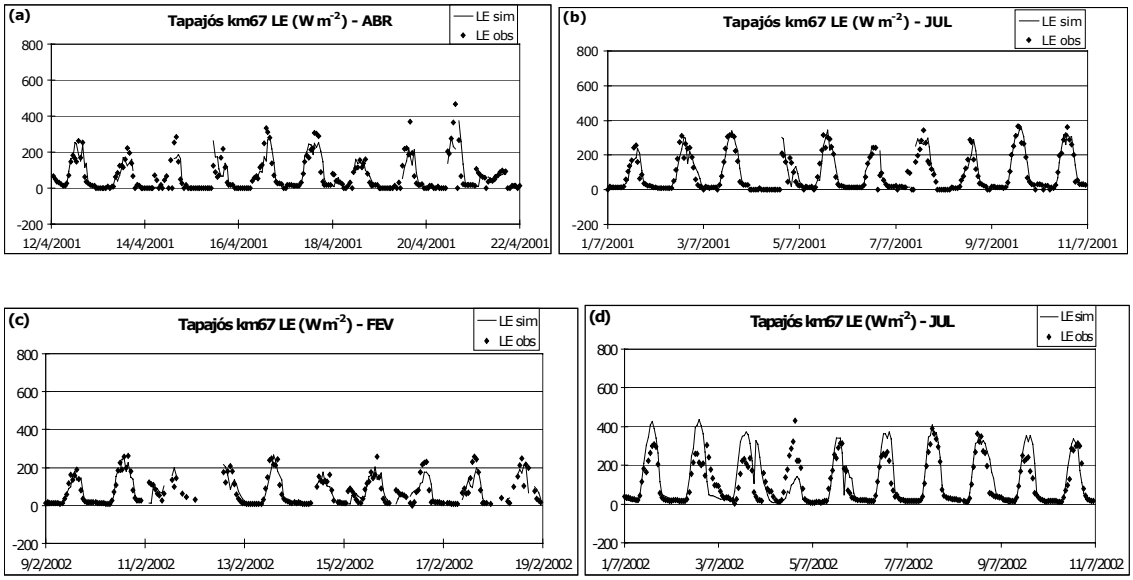

Figura 24- Igual à Figura 20, mas para fluxo de calor latente (W m^{-2}).

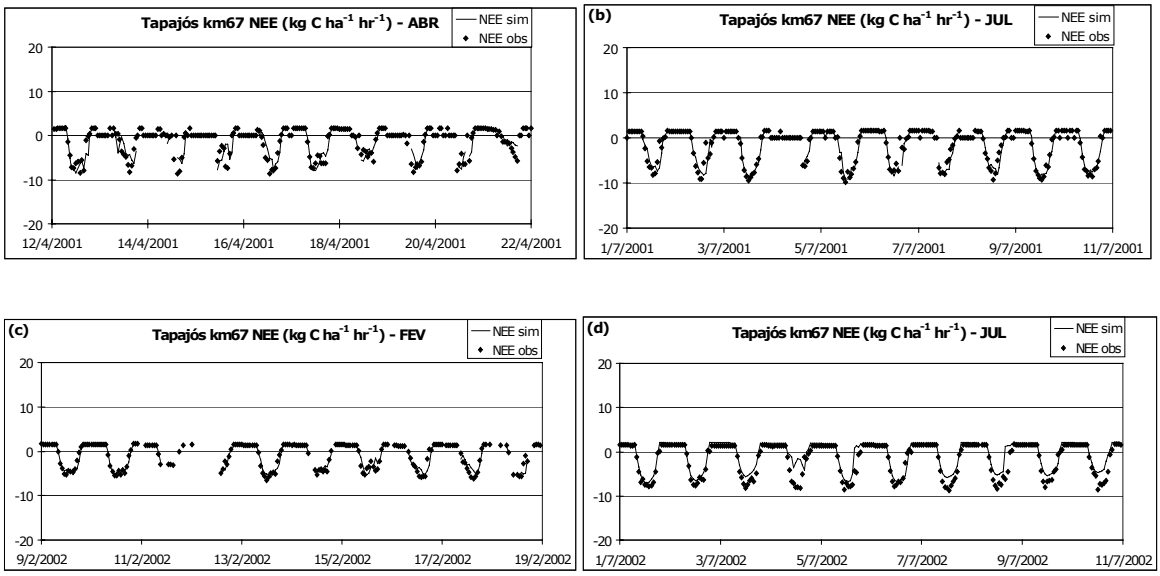

Figura 25- Igual à Figura 20, mas para a troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1}).

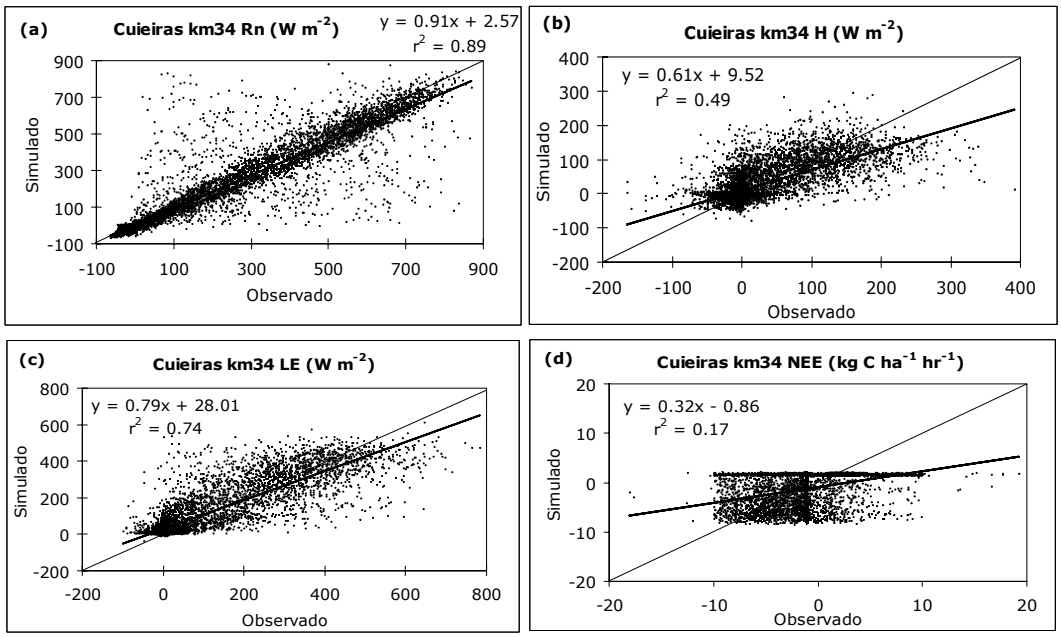

Figura 26- Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE), para a Reserva do Cuieiras.

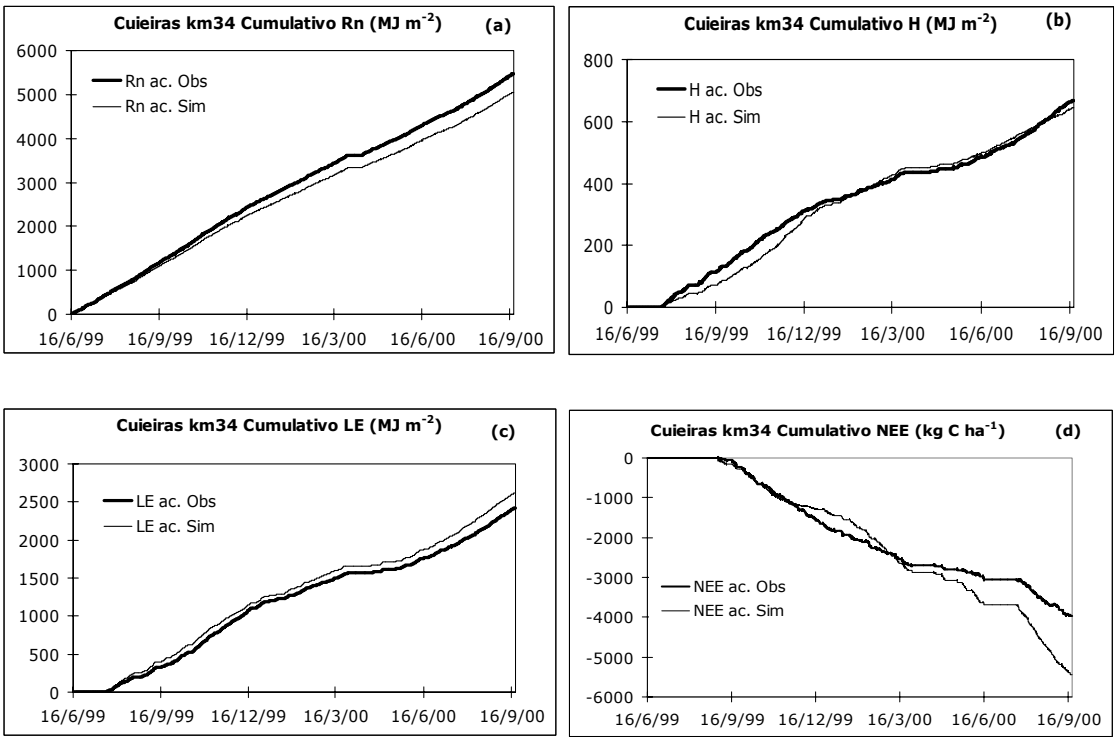

Figura 27- Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE, para Cuieiras.

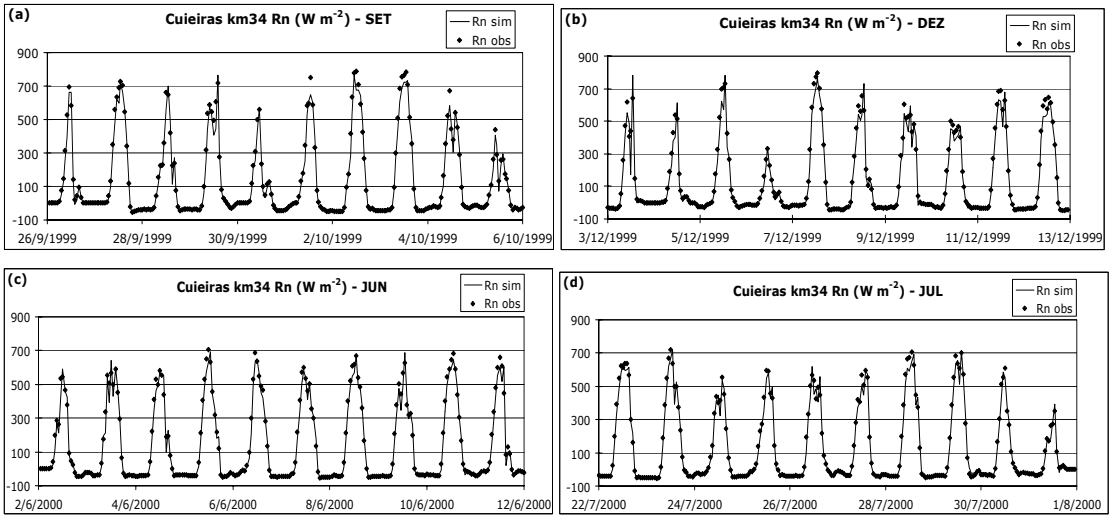

Figura 28- Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de setembro e dezembro de 1999 e junho e julho de 2000, para o sítio do Cuieiras. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados.

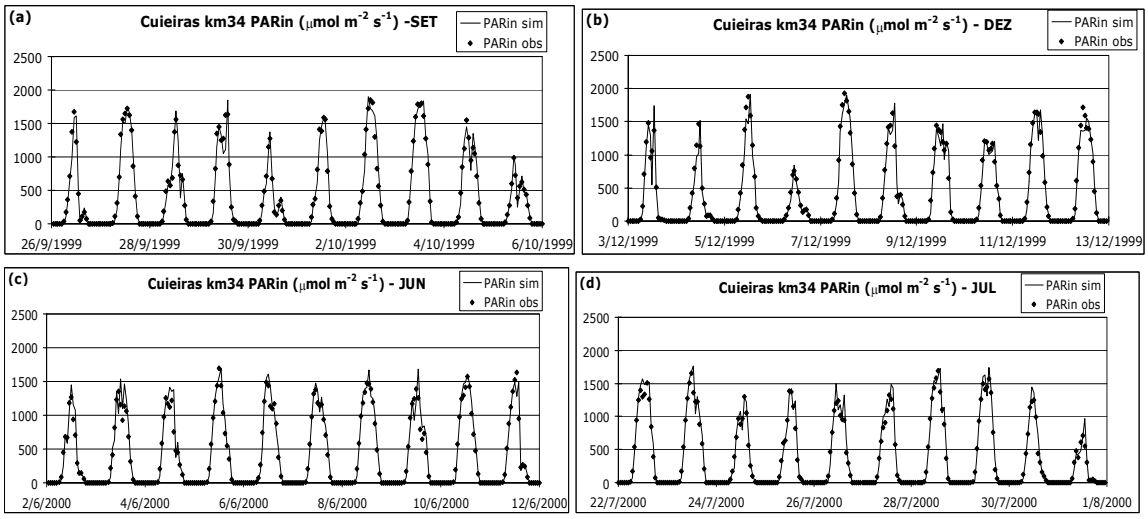

Figura 29- Igual à Figura 28, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol m^{-2} s^{-1}).

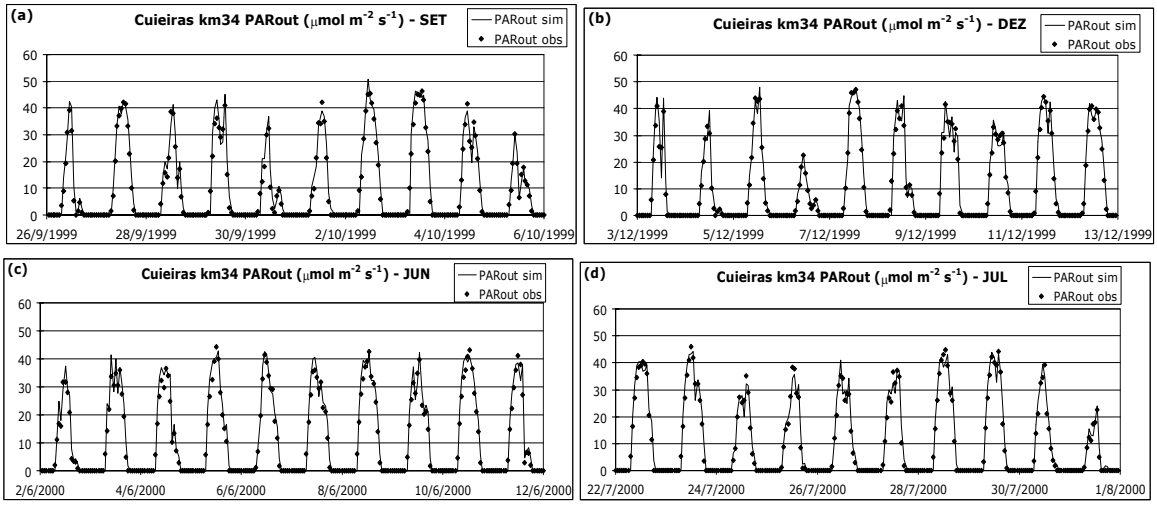

Figura 30- Igual à Figura 28, mas radiação fotossinteticamente ativa refletida (μmol m^{-2} s^{-1}).

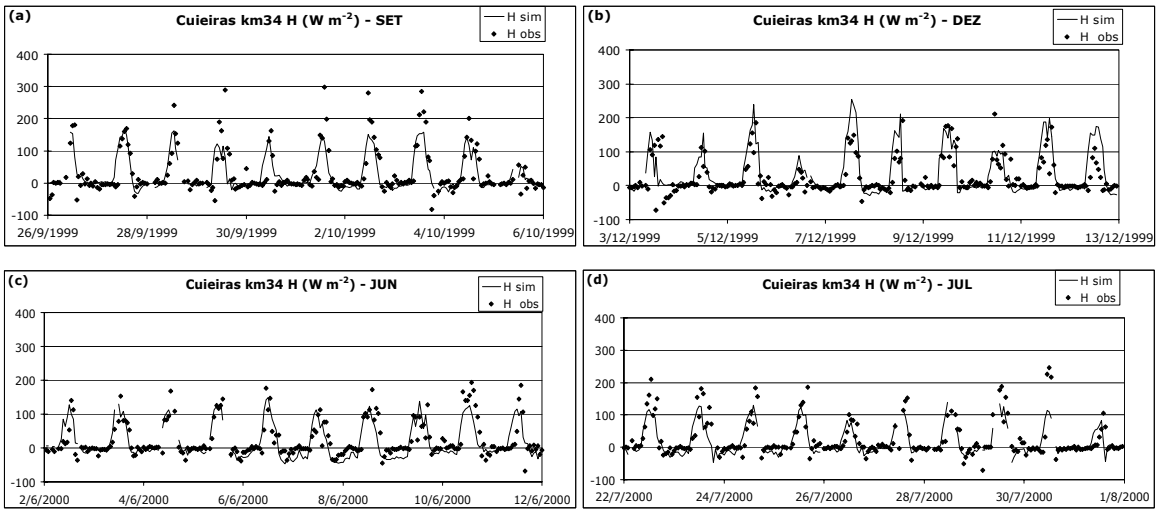

Figura 31- Igual à Figura 28, mas para fluxo de calor sensível (W m^{-2}).

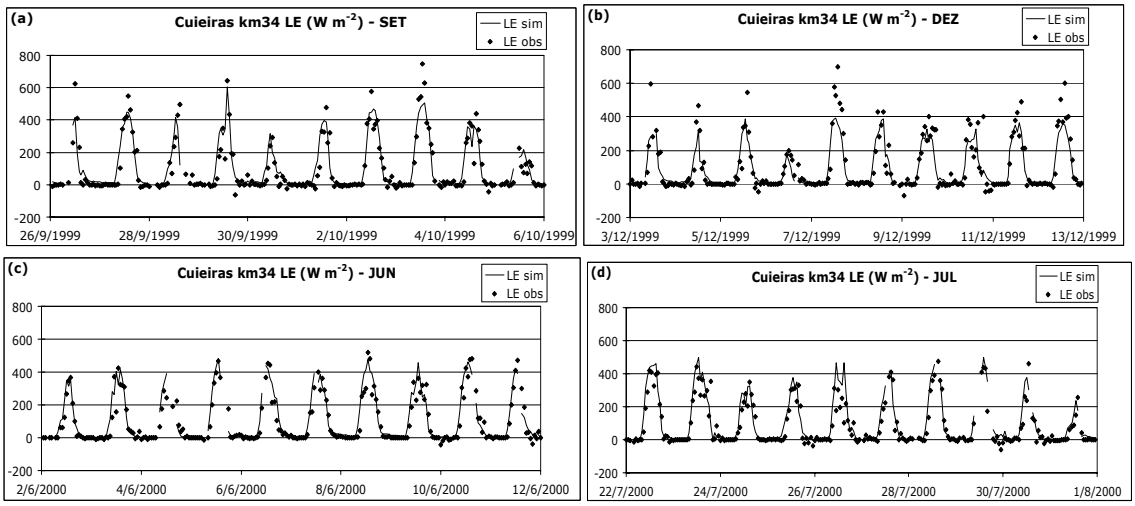

Figura 32- Igual à Figura 28, mas para fluxo de calor latente (W m^{-2}).

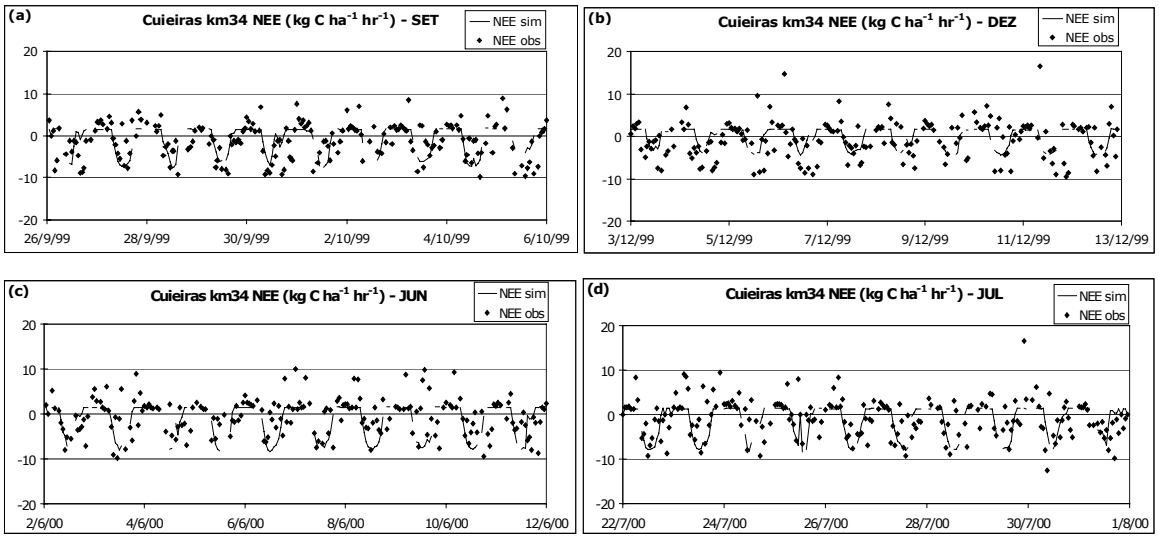

Figura 33- Igual à Figura 28, mas para a troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1}).

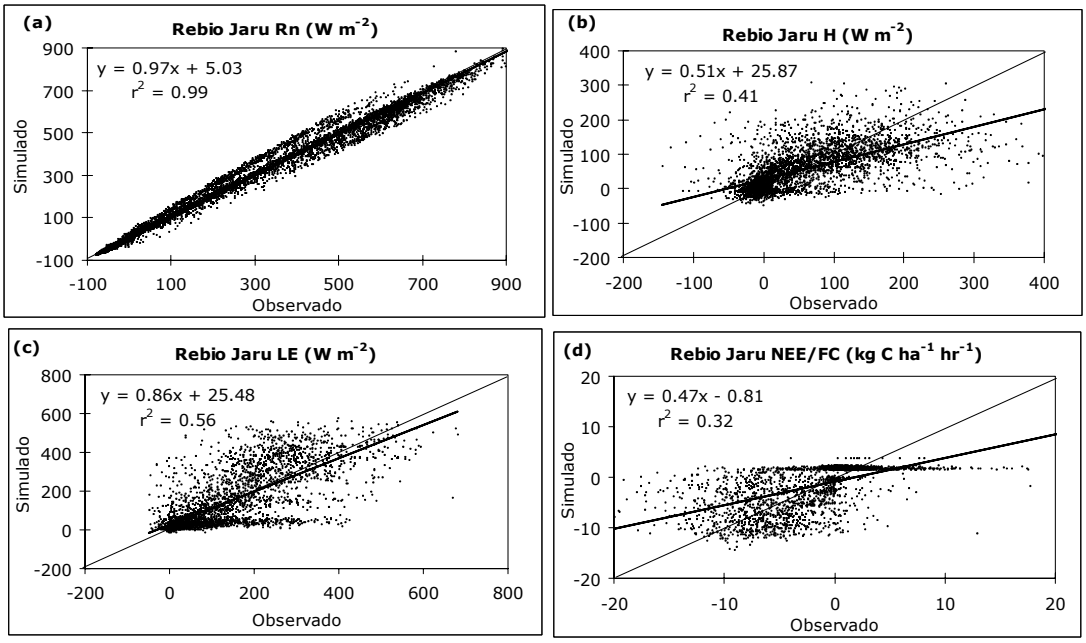

Figura 34- Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE) para a Rebio Jaru.

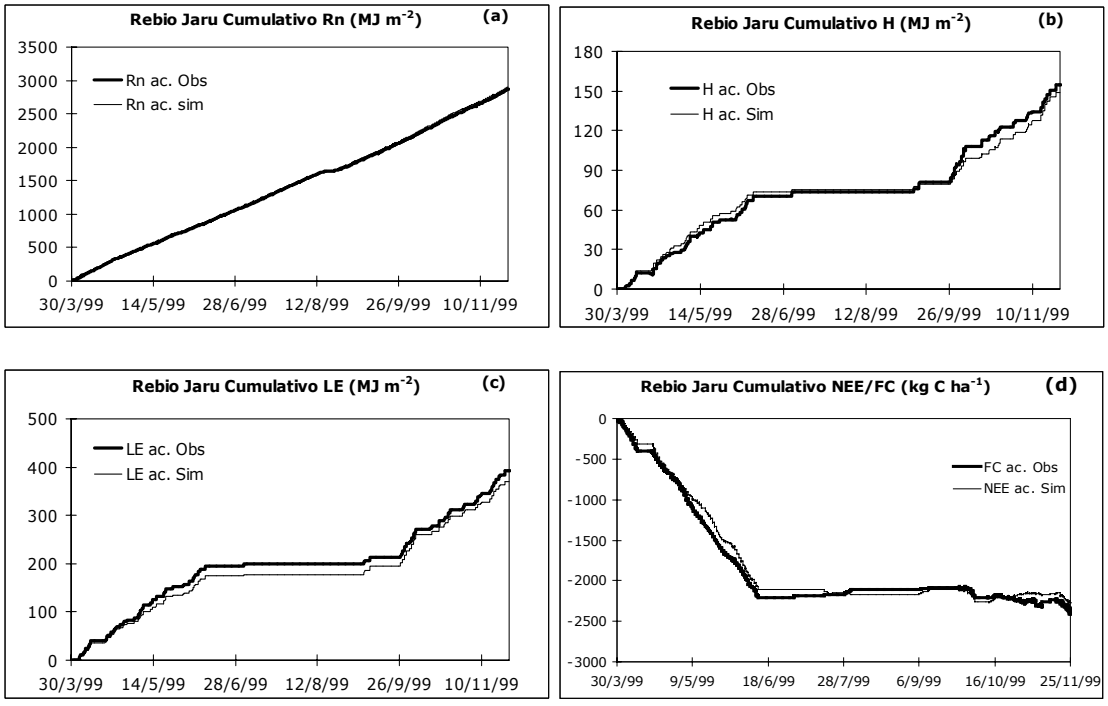

Figura 35- Gráfico cumulativo de R_n, H, LE e NEE para Rebio Jaru.

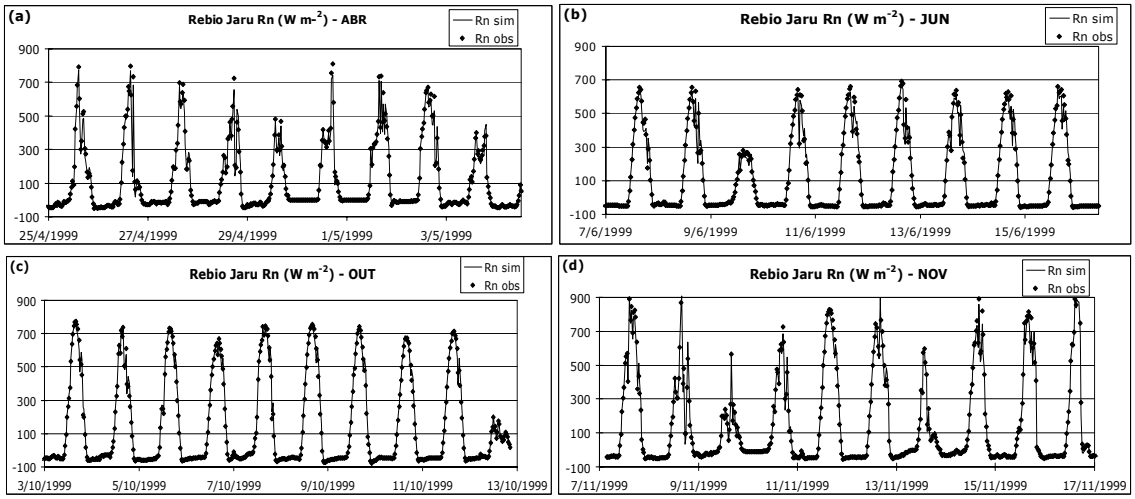

Figura 36- Saldo de radiação observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de abril, junho, outubro e novembro de 1999, para Rebio Jaru. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados.

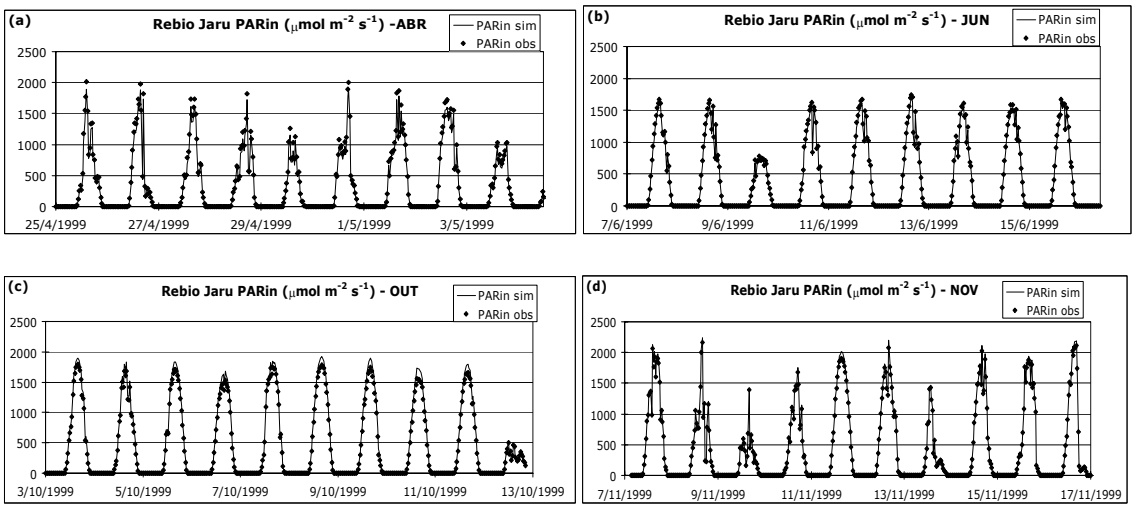

Figura 37- Igual à Figura 36, para radiação fotossinteticamente ativa incidente (μmol m^{-2} s^{-1}).

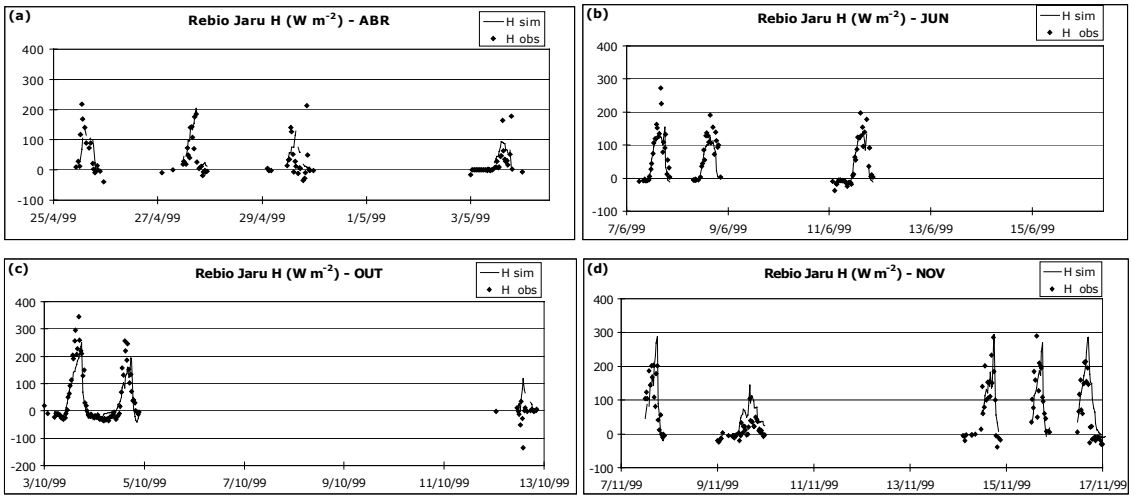

Figura 38- Igual à Figura 36, mas para o fluxo de calor sensível (W m^{-2}).

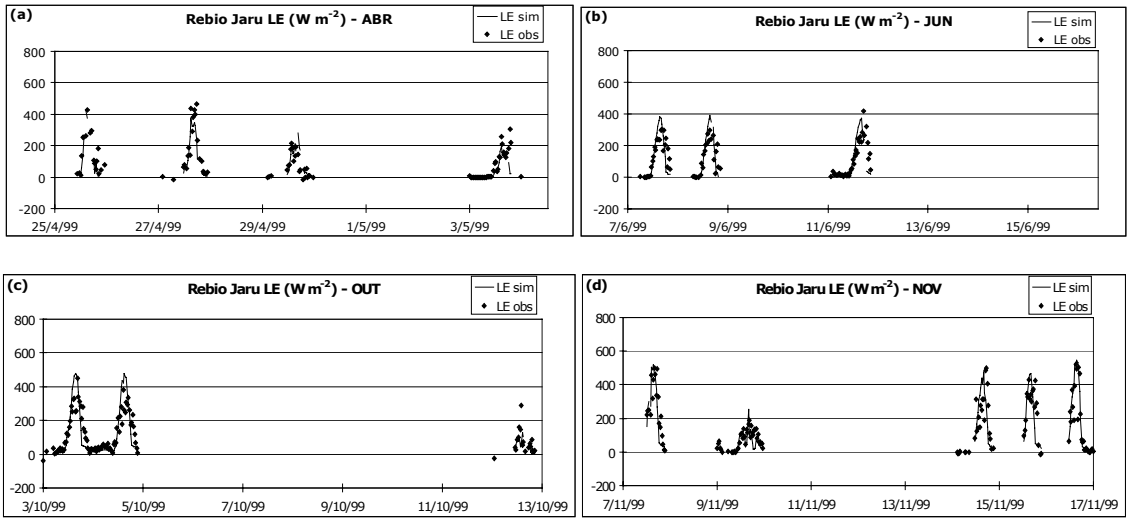

Figura 39- Igual à Figura 36, mas para o fluxo de calor latente (W m^{-2}).

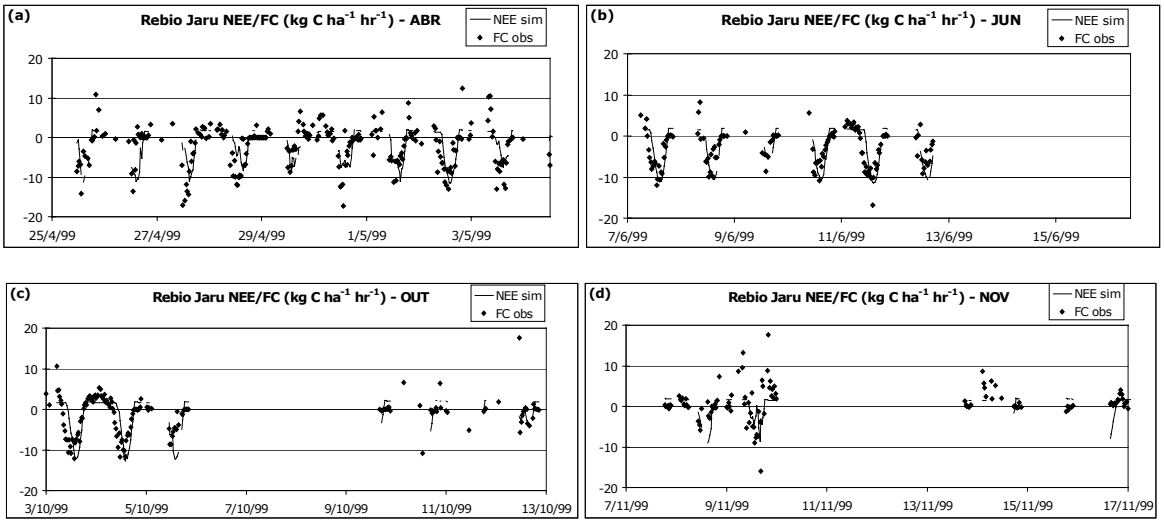

Figura 40- Igual à Figura 36, mas para o fluxo de gás carbônico e a troca líquida do ecossistema (kg C ha^{-1} hr^{-1}).

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Considerando-se que o modelo IBIS utiliza muitos parâmetros, e que alguns destes podem apresentar incertezas de especificações ou não ter nenhuma medida comparativa de campo, faz-se necessário validar estes parâmetros, visando à melhor representação das características locais do ecossistema e cálculo dos fluxos. Neste trabalho utilizaram-se medidas micrometeorológicas coletadas nos sítios experimentais do projeto LBA, respectivamente a Flona do Tapajós km 83 e km 67, Reserva do Cuieiras (km 34) e Rebio Jaru, na calibração do modelo IBIS. Para o procedimento de calibração buscou-se a otimização dos coeficientes de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão entre os dados simulados e observados (α), a minimização do erro relativo médio (ε) e da raiz do erro quadrado médio (RMSE).

Este trabalho também traz, para o contexto da calibração de modelos de fluxos de superfície, a discussão sobre a qualidade dos dados simulados e observados. Como o procedimento de calibração é muito mais bem sucedido quando os dados – tanto simulados quanto observados – de baixa qualidade são eliminados da análise,

este trabalho utilizou três critérios de filtragem para os dados observados e simulados. Dentre os três critérios utilizados, o limiar da velocidade de atrito (u^*_0) e o fechamento do balanço de energia (δ) foram os que mais eliminaram dados.

Foi feito inicialmente um teste com os parâmetros originais do modelo, quando simulou-se bem o saldo de radiação (R_n), a radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR_{in}) e a radiação fotossinteticamente ativa refletida (PAR_{out}). O modelo mostrou deficiências na simulação do fluxo de calor sensível (H), principalmente no período noturno, bem como do fluxo de calor latente (LE) e troca líquida do ecossistema (NEE). O fluxo de calor no solo (G) também não foi estimado satisfatoriamente pelo modelo.

Tendo em vista estas dificuldades do modelo, foi feita uma análise de sensibilidade do IBIS aos parâmetros biofísicos a serem calibrados para o sítio da Flona do Tapajós km 67. Na análise foi possível definir os valores mais consistentes dos parâmetros validados neste sítio através da minimização do RMSE no H e LE. Na simulação de H o modelo apresentou pouca sensibilidade aos parâmetros m e $V_{máx}$, sendo um pouco mais sensível a β_2, e bastante sensível a C_{HS}. Entretanto, na simulação de LE o modelo apresentou comportamento inverso, com forte resposta a β_2, principalmente para valores acima de 0,98, uma sensibilidade intermediária a m e $V_{máx}$ e pouca sensibilidade a C_{HS}. Na análise do RMSE médio entre H e LE verificou-se que o menor RMSE foram obtidos com $\beta_2 = 0{,}98$, $C_{HS} = 2{,}1.10^5$ J m^{-2} °C^{-1}, $m = 9$ e $V_{máx} =$ 65 μmol m^{-2} s^{-1}.

Um procedimento de calibração foi realizado envolvendo aproximadamente 95 simulações para cada um dos quatro sítios. Para cada sítio foi obtido um conjunto de parâmetros β_2, $V_{máx}$, m e C_{HS} que otimizavam as estatísticas ρ, α, ε e RMSE. O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo IBIS continuou simulando muito

bem R_n, PAR_{in} e PAR_{out}, mas, desta vez, proporcionou melhores resultados na determinação de H, LE, NEE e F_C, e, conseqüentemente, representou melhor a partição de energia na floresta. Isso pode ser observado na diminuição de ε e RMSE, melhoria em ρ e α, assim como no comportamento cumulativo dos fluxos. O modelo ainda continuou apresentando dificuldades em simular G satisfatoriamente. Talvez a amplitude do fluxo de calor no solo tenha sido superestimada devido à falta de uma camada residual na superfície, a qual poderia controlar, fortemente, a troca de energia e água entre a superfície do solo e a atmosfera, ou pela subestimativa do calor absorvido pelo dossel (Delire & Foley, 1999). O problema encontrado na simulação de NEE para a Reserva do Cuieiras está, provavelmente, relacionado ao pós-processamento dos dados observados de NEE, pois, aparentemente os critérios de pós-processamento e filtragem individual, utilizados nos demais sítios, não foram adotados na série da Reserva do Cuieiras km 34.

Em geral, os resultados simulados pelo modelo ajustaram-se bem aos dados observados em todos os sítios, representando bem a variabilidade horária dos fluxos utilizados para calibração do modelo. A calibração mais satisfatória foi atingida no sítio da Flona do Tapajós km 67. Tal fato pode ser devido a dois fatores: (a) utilização do procedimento prévio de análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros calibrados, através da minimização do RMSE de H e LE (feito apenas para este sítio); e (b) operacionalização deste sítio experimental pelo grupo de pesquisadores responsáveis.

O teste dos melhores parâmetros, obtidos em cada sítio, nos outros sítios forneceu uma resposta inicial sobre a representatividade da calibração feita utilizando-se dados de apenas um sítio para todo um vasto ecossistema. Dos quatro conjuntos de parâmetros obtidos dois (Flona km 83 e Rebio Jaru) mostravam-se semelhantes entre

si, e tendendo a aumentar g_s do conjunto inicial; e os demais (Flona km 67 e Cuieiras km 34) também foram semelhantes entre si, tendendo a reduzir g_s do conjunto inicial.

Mostrou-se posteriormente que, ao se utilizar os parâmetros calibrados de um sítio específico em todos os demais, introduziram-se erros consideráveis, penalizando a qualidade dos resultados simulados. Embora não esteja clara a razão pela qual dois conjuntos diferentes de parâmetros foram obtidos, existem possibilidades de que incluam: (a) erros na representação dos parâmetros físicos do solo; (b) diferenças nos sistemas de medidas e na operação do sítio experimental, bem como no tratamento dos dados coletados; (c) critérios flexíveis de filtragem dos dados (de entrada, simulados e observados) usados na análise; (d) as escalas espaciais de dinâmica de regeneração da floresta alteram-se possivelmente num período de 5 a 10 anos, por exemplo devido ao El Nino; (e) diferenças na estrutura e composição do ecossistema entre os diversos sítios. Embora as possibilidades (a), (b) e (c) estejam relacionadas aos procedimentos de coleta e análise de dados, as alternativas (d) e (e) implica que, talvez, seja necessário introduzir modificações nos modelos de modo a contemplar a variação espacial em alguns parâmetros biofísicos da vegetação, além dos parâmetros que já têm sua variação espacial representada no momento, como no caso do LAI.

Em geral, conclui-se que os parâmetros ajustados à série de dados de um específico sítio não são representativos para todo um bioma, como a floresta amazônica.

A conclusão obtida no presente trabalho e as dificuldades encontradas durante sua execução têm importantes implicações. Em primeiro lugar, provavelmente é real a necessidade de se adicionar outros parâmetros que controlam os fluxos superficiais. Isto envolveria, por exemplo, a especificação do perfil do sistema

radicular, e de biomassa da vegetação. Em segundo lugar, a concepção e operação de redes de medições de fluxos, como o LBA e a FLUXNET, devem padronizar metodologias de modo a harmonizar os métodos de observação entre os diferentes sítios. Além disso, está clara a necessidade de maior interação entre os grupos que fazem medições de campo e os que fazem atividades de modelagem. Algumas atividades de modelagem seriam sensivelmente melhoradas se determinados dados estivessem disponíveis. Por exemplo, a simples disponibilidade de dados de L_{in} melhorou, consideravelmente, as estimativas de R_n (e demais fluxos) nos sítios do Cuieiras e Rebio Jaru, em relação aos sítios da Flona. Ou então, a disponibilidade de uma curva de retenção de água no solo, para cada sítio, eliminaria algumas das incertezas que ocorrem na análise dos dados.

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

(a) O estudo do efeito da qualidade dos dados nos parâmetros que melhor se ajustaram a cada série. Nesse estudo, seria utilizada a mesma metodologia do presente trabalho, variando-se os valores de δ e u^*_0.

(b) O estudo do efeito do erro introduzido pelo desconhecimento dos reais parâmetros físicos do solo no cálculo dos fluxos. Tal estudo consistiria de duas simulações: em uma seriam usados parâmetros de solo derivados de medições locais de textura do solo (análogo a este trabalho); e em outra seriam usados parâmetros de solo obtidos por meio da análise da curva de retenção de água no solo.

(c) O desenvolvimento de um software para automatizar o processo de calibração hierárquica de modelos de fluxos, proposto no presente trabalho, a fim de ampliar o número de variáveis otimizadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvalá, R.C.S., Gielow, H.R., Freitas, H.C., Lopes, J M., Manzi, A.O., von Randow, C., Dias, M.A.F.S., Cabral, O.M.R., & Waterloo, M.J., Intradiurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content, and thermal properties under forest and pasture in Rondônia. *J. Geophys. Res.*, 107, doi: 10.1029/2001JD000599, 2002.

Araújo, A.C., Nobre, A.D., Kruijt, B., Elbers, J.A., Dallarosa, R., Stefani, P., von Randow, C., Manzi, A.O., Culf, A.D., Gash, J.H.C., Valentini, R., & Kabat, P., Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. *J. Geophys. Res.*, 107: 8090, doi: 10.1029/2001JD000676, 2002.

Bonan, G.B., Land-atmosphere CO_2 exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. *J. Geophys. Res*., 100, 2817-2831, 1995.

Carswell, F.E., Costa, A.L., Palheta, M., Malhi, Y., Meir, P., Costa, P.R., Ruivo, M. de L., Leal, L. do S.M., Costa, J.M.N., Clement, R.J., & Grace, J., Seasonality in CO_2 and

H_2O flux at an Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.*, 107: 8076, doi: 10.1029/2000JD000284, 2002.

Correia, F. W. S., Modelagem do impacto de Modificações da Cobertura Vegetal Amazônica no Clima Regional e Global. 358 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 2005.

Curtis, P.S., Hanson, P.J., Bolstad, P., Barford, C., Randolph, J.C., Schmid, H.P., & Wilson, K.B., Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. *Agric. Forest Meteorol*. 113, 3-19, 2002.

Delire, C., & Foley, J.A., Evaluating the performance of a land surface / ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. *J. Geophys. Res.*, 104, 16.895-16.909, 1999.

Dickinson, R.E., Sellers, P.J. Kennedy, & Wilson, M.F, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR CCM, NCAR/TN-275-STR. *Nat. Cent. for Atmos. Res*., Boulder, Colo., 1986.

Farquhar, G.D., & Sharkey, T.D., Stomatal conductance and photosyntheses. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 33, 317-345, 1982.

Farquhar, G.D., Caemmerer, V.S., & Berry, J.A., A biogeochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 149, 78-90, 1980.

Foley, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S., & Haxeltine, A., An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 603-628, 1996.

Goulden, M.L., Miller, S.D., Menton, M.C., da Rocha, H.R., & Freitas, H.C., Diel and seasonal patterns of tropical forest CO_2 exchange. *Ecological Applications*, 14, S42-S54, 2004.

Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., & Schulze, E.D., A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108, 389-411, 1996.

Jackson, R.B., Mooney, H.A., & Schulze, E.D., A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 94, 7362-7366, 1997.

Kruijt, B., Elbers, J.A., von Randow, C., Araujo, A.C., Oliveira, P,J, Gulf, A., Manzi, A.O., Nobre, A.D., Kabat, P., & Moors, E.J., The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rain forest conditions. *Ecol. Appl.*, 14, 101-113, 2004.

Kucharik, C.J., Foley, J.A., Delire, C., Fisher, V.A., Coe, M.T., Gower, S.T., Lenters, J.D., Youngmolling, C., Norman, J. M., & Ramankutty, N., Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance end vegetation structure. *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 795-825, 2000.

Kustas, W.P., Prueger, J.R., Humes, K.S., & Starks, P.J., Estimation of surface heat fluxes at field scale using surface layer versus mixed layer atmospheric variables with radiometric temperature observations. *J. Appl. Meteorol.* 38, 224-238, 1999.

Larcher, W., Ecofisiologia Vegetal. Ed. RIMA, São Carlos, SP, 2000.

Leuning, R., A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. *Plant. Cell Environ*., 18, 339-355, 1995.

Malhi, Y., Pegoraro, E., Nobre, A.D., Pereira, M.G.P., Grace, J., Culf, A.D., & Clement R., Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.,* 107, NO. D20, 8061, doi: 10.1029/2001JD000623, 2002.

Oleson, K.W., Dai, Y., Bonan, G. B., Bosilovich, M., Dickinson, R., Dirmeyer, P., Hoffman, F., Houser, P., Levis, S., Niu, G-Y., Thornton, P., Vertenstein, M., Yang, Z.-L., Zeng, X. T*echnical description of the Community Land Model (CLM)*. NCAR Technical note TN-461+STR, 2004. 174p.

Pitman, A.J., The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for Climate Models. *J. Climatology*, 23, 479-510, 2003.

Pollard, D., & Thompson S.L., Use of a land-surface-transfer scheme (LSX) in a global climate model: The response to doubling stomatal resistance. *Global Planet. Change*, 10, 129-161, 1995.

Rocha, H.R., Sellers, P.J., Collatz, G.J., Wright, I.R. & Grace, J., Calibration and use of the SiB2 model to estimate water vapour and carbon exchange at the ABRACOS forest sites. In: Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M. & Victoria R.L., *Amazonian deforestation and climate*. John Wiley and Sons, 1st ed., 1996, p. 459 - 473.

Rocha, H.R., Goulden, M.L., Miller, S.D., Menton, M.C., Pinto, L.D.V.O., Freitas, H.C. & Figueira, A.M.S., Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecol. Appl.*,14, 22-32, 2004.

Saleska, S.R., Miller, S.D., Matross, D.M., Goulden, S.C. Wofsy, Rocha, H.R., Camargo, P.B., Crill P., Daube, H.C. de Freitas, Hutyra L., Keller, M., Kichhoff V., Menton M., Munger J.W., Pyle E.H., Rice A.H., & Silva H., Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance – induced losses. *Science*, 302: 1554-1557, 2003.

Santos, S.N.M. & Costa, M.H., Simulações de fluxo de gás carbônico em um ecossistema de Floresta Tropical. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 18, 87-96, 2003.

Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., & Dalcher A., A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmospheric Science*, 43, 505-531, 1986.

Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collello, G.D, & Bounoua, L., A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs: Model formulation. *J. Climate*, 9, 676-705, 1996.

Sellers, P.J., Shuttleworth, J., Dorman, L., Dalcher, A., & Roberts, J., Calibrating the single biosphere model for Amazonian tropical forest using field and remote sensing data. Part I: Average calibration with field data. *J. Appl. Meteorol.* 28, 727-759, 1989.

Senna, M.C.A. Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela Floresta Tropical Amazônica: Uma Comparação entre Estimativas Baseadas em Modelagem, Sensoriamento Remoto e Medições de Campo. Tese de mestrado em Meteorologia Agrícola. 38p., Viçosa, 2004.

Twine, T.E., Kustas, W.P., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., & Wesely, M.L., Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agr. and Forest Met*., 103, 279-300, 2000.

von Randow, C., Manzi, A.O., Kruijt, B., Oliveira de P.J., Zanchi, F.B., Silva, R.L., Hodnett, M.G., Gash, J.H.C., Elbers, J.A., Waterloo, M.J., Cardoso, F.L., Kabat, P., Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. Theor. Appl. Climatol., 78, 5-26, 2004.