

EDSON LUÍS NUNES

**ALGORITMO REGIONAL DE MONITORAMENTO DA TAXA DE FIXAÇÃO
DE CARBONO PELAS FLORESTAS TROPICAIS DA AMÉRICA DO SUL**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

EDSON LUÍS NUNES


**ALGORITMO REGIONAL DE MONITORAMENTO DA TAXA DE FIXAÇÃO
DE CARBONO PELAS FLORESTAS TROPICAIS DA AMÉRICA DO SUL**

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

APROVADA: 15 de fevereiro de 2008.



**Prof. Pedro Leite da Silva Dias
(Co-orientador)**



**Pesq. Simone Aparecida Vieira
(Co-orientadora)**



Pesq. Luciano Lisboa Junior



Prof. Agostinho Lopes de Souza



**Prof. Marcos Heil Costa
(Orientador)**

**Este trabalho é dedicado à
meu pai Adilson “*in memorian*”,
minha mãe Maria,
meu irmão Evandro “*in memorian*”,
minha irmã Kátia,
minha esposa Lourdinha,
minhas filhas Edilene e Camila
e meus sogros Moisés e Diolinda “*in memorian*”.**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo (CEFETES), na pessoa do Diretor Geral Prof. Jadir José Pella, pelo apoio incondicional à minha liberação para capacitação no período deste curso.

À minha esposa Maria de Lourdes do Nascimento Nunes pelo grande apoio nas horas difíceis em que me encontrei, pelos incentivos profissionais, pelo amor, força e amizade.

Aos grandes amigos e irmãos da arte real professor Mauro Luiz Campos Pereira, professor Dr. Tarcísio de Assunção Pizziolo e pesquisador Brauliro Gonçalves Leal, pelo incentivo e apoio na realização deste curso.

Ao grande amigo Ricardo Silva pelo companheirismo e ajuda durante o momento mais difícil que passei na realização deste curso, onde nem mesmo a distância foi obstáculo para suas ações.

Ao professor Dr. Marcos Heil Costa, pela orientação, amizade e apoio profissional.

À Aracruz Celulose SA, na pessoa do Gerente de Meio Ambiente e Segurança Florestal Dr. Luciano Lisboa Junior, pelo incentivo à pesquisa, pela disponibilização de sua área, de recursos financeiros e humanos, sem os quais a realização deste trabalho seria fortemente prejudicada.

À pesquisadora Dra. Simone Vieira pela orientação e participação na montagem do experimento de campo.

Ao comitê orientador e membros da banca de qualificação professor Dr. Marcos Heil Costa, professor Dr. Pedro Leite da Silva Dias, pesquisadora Dra. Simone Vieira, professor Dr. Aristides Ribeiro e professor Dr. José Marinaldo Gleriani pelas valiosas sugestões e contribuições propostas para realização deste trabalho.

Ao projeto LBA, pelo fornecimento dos dados experimentais dos sítios estabelecidos na Floresta Nacional de Tapajós em Belterra-PA e em SINOP-MT.

À pesquisadora Luciana Sanches pela agilidade e apoio na disponibilização dos dados do sítio de SINOP.

A todos os Professores do curso de Meteorologia Agrícola, em especial aos professores Drs. Sérgio Zolnier, Gilberto Sediya e Luiz Cláudio Costa pelos valiosos conhecimentos transmitidos através de suas disciplinas com dedicação, profissionalismo e amizade.

Às estudantes de mestrado Lucía Iracema Chipponelli Pinto e Márcia Cristina Biajoli pela participação durante as medidas do experimento de campo.

À estudante de iniciação científica Gabrielle Ferreira Pires pela ajuda no preparo dos mapas.

Aos estudantes do Grupo de Pesquisa em Climatologia, Cleverson, Christiane, Francisca, Gabrielle, Gleidson, Hewlley, Lucía, Márcia, Marcos Paulo, Mônica, Santiago, Sílvia, Thomé e Varejão, pelo coleguismo e pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas das Áreas de Meteorologia, em especial Marcos Vanderlei, Vanda, Evandro, Marcelo, Leonardo (Rondônia), Leonardo (Gaúcho), Rafael e Carlinhos pelo apoio e amizade.

A todos os demais professores, colegas e funcionários que, direta ou indiretamente, participaram da realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

BIOGRAFIA

EDSON LUÍS NUNES, filho de Adilson Nunes e Maria da Conceição Nunes, nasceu em 04 de setembro de 1964, na cidade de Colatina-Espírito Santo-Brasil.

Em dezembro de 1988 concluiu o curso de Bacharelado em Física pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em abril de 1992 concluiu o curso de mestrado em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em março de 1993 assumiu o cargo de Professor Efetivo de Física do Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo na UnEd-Colatina.

Em fevereiro de 1998 concluiu o curso de especialização em Educação pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Em março de 2004 iniciou o curso de pós-graduação, em nível de doutorado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xx
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxiv
RESUMO.....	xxvi
ABSTRACT.....	xxix
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
2.1. Descrição do Algoritmo RATE.....	9
2.1.1. Modelo SITE.....	11
2.1.2. Cobertura do Solo.....	14
2.1.2.1. Produto de Assimilação da Cobertura do Solo.....	18
2.1.3. LAI e FAPAR (MOD15A2).....	21
2.1.3.1. Produto de Assimilação de LAI e FAPAR.....	23
2.1.4. Variáveis Meteorológicas de Re-análise.....	24
2.1.4.1. Produto de Assimilação das Variáveis Meteorológicas	24

2.2. Calibração, Validação e Comparação do Algoritmo RATE.....	25
2.2.1. Medidas de Campo.....	27
2.2.1.1. Sítio KM67.....	27
2.2.1.2. Sítios ZF-2 e UFAC.....	32
2.2.1.3. Sítio SINOP.....	32
2.2.1.4. Sítio BA712.....	34
2.2.2. Dados de NPP do MODIS (MOD17A3).....	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
3.1. Produto de Assimilação da Cobertura do Solo.....	40
3.2. Produto de assimilação de LAI e FAPAR.....	43
3.3. Produto de Assimilação das Variáveis Meteorológicas.....	52
3.4. Dados de NPP	52
3.4.1. Medidas de Campo.....	52
3.4.2. Dados do MOD17A3.....	61
3.5. Calibração do Modelo SITE.....	64
3.6. Quantificação do Erro para os Sítios KM67 e BA712.....	76
3.7. Validação do Algoritmo RATE e Comparação com o MOD17A3.....	93
3.8. Estudo de Caso.....	99
4. CONCLUSÕES.....	110
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Áreas de Mata Atlântica Remanescentes.	2
Figura 2 -	Áreas da Floresta Amazônica Desmatada.	3
Figura 3 -	Fluxograma do algoritmo RATE.	10
Figura 4 -	Fluxograma do modelo SITE.	12
Figura 5 -	Representação esquemática do modelo. u , s , g e d , referem-se às folhas, galhos, camada superficial do solo e camada profunda do solo, respectivamente.	13
Figura 6 -	Sistema de mosaico (tiles) do MODIS. Qualquer localização na superfície da Terra pode ser espacialmente referenciada usando os indicadores horizontais (H) e Verticais (V). Cada tile tem 1200 x 1200 quilômetros.	15
Figura 7 -	Composição de 31 tiles do MODIS necessária para cobrir toda a América do Sul.	20
Figura 8 -	(a) Relação entre NDVI e LAI e (b) relação entre FAPAR e NDVI.	22
Figura 9 -	Localização dos sítios experimentais.	26
Figura 10 -	Imagem do Ikonos para o sítio KM67 com as localizações dos transects e da torre de medição de fluxos.	28

Figura 11 -	Visualização dos instrumentos de medidas meteorológicas do sítio BA712.	35
Figura 12 -	Imagem da localização da área experimental, do sítio e das parcelas no sítio BA712. Fonte: Google Earth.	37
Figura 13 -	Foto da instalação da banda dendrométrica e da medida do seu incremento diamétrico para o sítio BA712.	37
Figura 14 -	Grade do MODIS para os sítios: (a) ZF-2; (b) KM67; (c) UFAC; (d) BA712.	39
Figura 15 -	Mapa da cobertura do solo assimilada para o bioma de floresta tropical da América do Sul em uma grade de 0,40°.	41
Figura 16 -	Mapa da frequência de ocorrência do bioma de floresta tropical em cada pixel de 0,40° para a América do Sul.	42
Figura 17 -	Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio KM67 em 2002.	44
Figura 18 -	Série temporal de LAI obtida a partir do MOD15A2 para o sítio KM67 em 2004.	44
Figura 19 -	Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2001.	45
Figura 20 -	Série temporal de LAI obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2001.	45
Figura 21 -	Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2002.	46
Figura 22 -	Série temporal de LAI obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2002.	46
Figura 23 -	Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2003.	47
Figura 24 -	FAPAR médio mensal observado para o sítio KM67 em 2002.	47

Figura 25 -	LAI médio mensal observado para o sítio KM67 em 2004.	48
Figura 26 -	FAPAR médio mensal observado para o sítio SINOP em 2001.	48
Figura 27 -	LAI médio mensal observado para o sítio SINOP em 2001.	49
Figura 28 -	FAPAR médio mensal observado para o sítio SINOP em 2002.	49
Figura 29 -	LAI médio mensal observado para o sítio SINOP em 2002.	50
Figura 30 -	FAPAR médio mensal observado para o sítio SINOP em 2003.	50
Figura 31 -	(a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio KM67 em 2002.	53
Figura 32 -	(a) Série temporal de LAI do MOD15A2 e de LAI assimilado; (b) valores médios mensais de LAI observado e de LAI assimilado; para o sítio KM67 em 2004.	54
Figura 33 -	(a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio SINOP em 2001.	55
Figura 34 -	(a) Série temporal de LAI do MOD15A2 e de LAI assimilado; (b) valores médios mensais de LAI observado e de LAI assimilado; para o sítio SINOP em 2001.	56
Figura 35 -	(a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio SINOP em 2002.	57
Figura 36 -	(a) Série temporal de LAI do MOD15A2 e de LAI assimilado; (b) valores médios mensais de LAI observado e de LAI assimilado; para o sítio SINOP em 2002.	58
Figura 37 -	(a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio SINOP em 2003.	59

Figura 38 -	Mapas com os Campos das variáveis meteorológicas de Sin, Lin, Ta, qa, ua e P assimiladas para o dia 01 de janeiro de 2004 as 12 h.	60
Figura 39 -	Gráfico cumulativo de (a) Rn; (b), (c), (d) e (e) gráficos de Rn observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.	66
Figura 40 -	Gráfico cumulativo de (a) PARi; (b), (c), (d) e (e) gráficos de PARi observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.	67
Figura 41 -	Gráfico cumulativo de (a) H; (b), (c), (d) e (e) gráficos de H observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.	68
Figura 42 -	Gráfico cumulativo de (a) LE; (b), (c), (d) e (e) gráficos de LE observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.	69
Figura 43 -	Gráfico cumulativo de (a) NEE Total e (b) NEE Diurno; (c), (d), (e) e (f) gráficos de NEE observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.	70
Figura 44 -	Gráfico de (a) ρ , (b) α e (c) RMSE para H no Sítio KM67 em função de $V_{\text{máx}}$ e m, para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$.	71
Figura 45 -	Gráfico de (a) ρ , (b) α e (c) RMSE para LE no Sítio KM67 em função de $V_{\text{máx}}$ e m, para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$.	72
Figura 46 -	Gráfico de (a) ρ , (b) α e (c) RMSE para NEE no Sítio KM67 em função de $V_{\text{máx}}$ e m, para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$.	73

Figura 47 -	LAI observado e LAI Simulado pelo SITE; e seus valores médios anuais, RMSE e erro relativo para o Sítio KM67 em 2004.	75
Figura 48 -	(a) Gráfico da relação entre Ta observado e Ta assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Ta observado e Ta assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.	78
Figura 49 -	(a) Gráfico da relação entre qa observado e qa assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de qa observado e qa assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.	79
Figura 50 -	(a) Gráfico da relação entre ua observado e ua assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de ua observado e ua assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.	80
Figura 51 -	(a) Gráfico cumulativo de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.	81
Figura 52 -	(a) Gráfico cumulativo de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.	82
Figura 53 -	(a) Gráfico cumulativo de P observado e P assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de P observado e P assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.	83

Figura 54 -	(a) Gráfico da relação entre Ta observado e Ta assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Ta observado e Ta assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.	84
Figura 55 -	(a) Gráfico da relação entre qa observado e qa assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de qa observado e qa assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.	85
Figura 56 -	(a) Gráfico da relação entre ua observado e ua assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de ua observado e ua assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.	86
Figura 57 -	(a) Gráfico cumulativo de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.	87
Figura 58 -	(a) Gráfico cumulativo de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.	88
Figura 59 -	(a) Gráfico cumulativo de P observado e P assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de P observado e P assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.	89

Figura 60 -	LAI observado, LAI simulado pelo SITE com dados da estação meteorológica e LAI simulado pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP; e seus valores médios anuais, RMSE e erros relativos percentuais para o Sítio KM67 em 2004.	92
Figura 61 -	Valores de NPP para os sítios ZF-2, KM67, UFAC e BA712.	95
Figura 62 -	LAI observado, LAI assimilado do MOD15A2, LAI simulado pelo SITE com dados da estação meteorológica, LAI simulado pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e LAI simulado pelo RATE para o Sítio KM67 em 2004.	97
Figura 63 -	LUE observada, LUE estimada pelo algoritmo de NPP do MODIS (MOD17A3), LUE simulada pelo SITE com dados da estação meteorológica, LUE simulada pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e LUE simulada pelo RATE para o Sítio KM67 em 2004.	98
Figura 64 -	Série temporal de NPP média anual gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para as Florestas tropicais do América do Sul; e o valor médio observado para todo o período.	100
Figura 65 -	Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio ZF-2, e os valores observados.	101
Figura 66 -	Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio KM67, e os valores observados.	101
Figura 67 -	Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio UFAC, e os valores observados.	102
Figura 68 -	Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio BA712, e os valores observados.	102
Figura 69 -	Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2001.	104

Figura 70 -	Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2002.	105
Figura 71 -	Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2003.	106
Figura 72 -	Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2004.	107
Figura 73 -	Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2005.	108
Figura 74 -	Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2006.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Unidades de cobertura do solo do IGBP.	17
Tabela 2 -	Comparações de classificação.	19
Tabela 3 -	Valores médios anuais de LAI, erro relativo e fator de calibração para o produto de LAI assimilado.	51
Tabela 4 -	Valores médios anuais de FAPAR, erro relativo e fator de calibração para o produto de FAPAR assimilado.	51
Tabela 5 -	Valores médios e desvio padrão da alocação de biomassa observada para o sítio KM67 em 2004.	62
Tabela 6-	Valores médios com desvio padrão da NPP observada para o sítio KM67 em 2004 e para o sítio BA712 em 2006.	62
Tabela 7 -	Valores da NPP observada para o sítio KM67 em 2001, para o sítio ZF-2 em 2001 e 2002, e para o sítio UFAC em 2001 e 2002.	63
Tabela 8 -	Valores médios da NPP com desvio padrão obtidos a partir do MOD17A3 para o sítio KM67 em 2001 e 2004, para o sítio ZF-2 em 2001 e 2002, para o sítio UFAC em 2001 e 2002, e para o sítio BA712 em 2006.	63

Tabela 9 -	Valores médios, erro relativo, ρ , α e RMSE entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto de parâmetros calibrados para o Sítio KM67. As unidades referem-se aos valores médios e RMSE, pois ρ e α são adimensionais.	65
Tabela 10 -	Parâmetros não calibrados (Iniciais) e parâmetros calibrados para o Sítio KM67.	65
Tabela 11 -	NPP observada, NPP Simulada pelo SITE e erro relativo para o Sítio KM67 em 2004.	75
Tabela 12 -	Valores médios com desvio padrão das variáveis meteorológicas de Ta, qa, ua, Sin, Lin e P, e os coeficientes RMSE, erro relativo e coeficiente de variação entre os valores das variáveis assimiladas a partir dos dados de re-análise do NCEP e os valores das variáveis observadas para o sítio KM67 no período de 2004 a 2006.	77
Tabela 13 -	Valores médios com desvio padrão das variáveis meteorológicas de Ta, qa, ua, Sin, Lin e P, e os coeficientes RMSE, erro relativo e coeficiente de variação entre os valores das variáveis assimiladas a partir dos dados de re-análise do NCEP e os valores das variáveis observadas para o sítio BA712 no de 2006.	77
Tabela 14 -	Valores médios, erro relativo, ρ , α e RMSE entre os dados observados e simulados, para a simulação com os dados assimilados da re-análise do NCEP para o Sítio KM67. As unidades referem-se aos valores médios e RMSE, pois ρ e α são adimensionais.	91
Tabela 15 -	NPP observada, NPP Simulada pelo SITE com dados da estação meteorológica e NPP Simulada pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP, e os erros relativos percentuais para o Sítio KM67 em 2004.	91

Tabela 16 -	Resultados da NPP e os erros relativos percentuais para os Sítios KM67, ZF-2, UFAC e BA712.	94
Tabela 17 -	Valores médios com desvio padrão, RMSE e erro relativo entre os dados observados e estimados de LAI pelo produto assimilado do MOD15A2, pelo SITE com dados da estação meteorológica, pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e pelo RATE para o km67 em 2004.	97
Tabela 18 -	Valores médios com desvio padrão, RMSE e erro relativo entre os dados observados e estimados de LUE pelo produto MOD17A3, pelo SITE com dados da estação meteorológica, pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e pelo RATE para o KM67 em 2004.	98

LISTA DE SÍMBOLOS

ANPP	NPP acima da superfície
APAR	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel
BNPP	NPP abaixo da superfície
Cs	Capacidade térmica dos galhos por unidade de área no dossel
Cu	Capacidade térmica das folhas por unidade de área no dossel
DAP	Diâmetro do tronco à altura do peito
EVI	Índice de vegetação melhorado
es	Pressão de saturação do vapor d'água
FAPAR	Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa que é absorvida pelo dossel
G	Fluxo de calor no solo
GPP	Fotossíntese bruta ou produção primária bruta

H	Fluxos calor sensível
k	Coeficiente de extinção da luz
LAI	Índice de Área Foliar
LE	Fluxos calor latente
Lin	Radiação de onda longa incidente
LUE	Eficiência de uso da luz
LUE _m	LUE máxima
m	Coeficiente relacionado à condutância estomática
NDVI	Índice de vegetação de diferença normalizada
NEE	Troca líquida de CO ₂ do ecossistema
NPP	Produção primária líquida
NPP _{cr}	NPP das raízes grossas
NPP _f	NPP de folhas
NPP _{fr}	NPP das raízes finas
NPP _w	NPP da madeira
P	Precipitação
Pa	Pressão atmosférica

PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
PAR _i	Radiação Fotossinteticamente Ativa incidente
PAR _r	Radiação fotossinteticamente ativa refletida
PAR _t	Radiação fotossinteticamente ativa transmitida
q _a	Umidade específica do ar
q _s	Umidade específica de saturação
r	Refletividade da radiação fotossinteticamente ativa
R _A	Respiração autotrófica dos ecossistemas
RMSE	Raiz do erro quadrado médio
R _n	Saldo de radiação
S	Taxa de variação da energia armazenada no dossel
S _{in}	Radiação de onda curta incidente ou radiação solar incidente
t	Transmissividade da radiação fotossinteticamente ativa
T _a	Temperatura do ar
TNPP	NPP Total
u*	Velocidade de fricção do vento
u _a	Velocidade horizontal do vento

URa	Umidade relativa do ar
$V_{m\acute{a}x}$	Capacidade máxima da enzima Rubisco à 15°C
z	Ângulo solar zenital
α	Inclinação da reta de regressão
ρ	Coeficiente de correlação
δ	Viés do fechamento do balanço de energia
λ	Emissividade do dossel
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.
ρ_{IVP}	Refletância no infravermelho próximo
ρ_V	Refletância no vermelho

LISTA DE ABREVIATURAS

CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
GMAO	Global Modeling and Assimilation Office
GSFC	Goddard Space Flight Center
HDF-EOS	Formato de dados hierárquico desenvolvido pelo National Center for Supercomputer Application
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISIN	Projeção Integerized Sinusoidal
LBA	Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MOD12Q1	Produto de cobertura do solo do MODIS
MOD15A2	Produto de LAI e FAPAR do MODIS
MOD17A3	Produto de NPP do MODIS
MRT	MODIS Reprojection Tool
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCL	NCAR Command Language
NCSA	National Center for Supercomputer Application
netCDF	network Common Data Form
RATE	Algoritmo regional para monitoramento automático da taxa de fixação de carbono pelos ecossistemas terrestres de florestas tropicais
SIG	Sistema de informação geográfica
SIN	Projeção Senoidal
SITE	Modelo de ecossistema tropical simples

RESUMO

NUNES, Edson Luís, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2008.
Algoritmo regional de monitoramento da taxa de fixação de carbono pelas florestas tropicais da América do Sul. Orientador: Marcos Heil Costa. Co-orientadores: Pedro Leite da Silva Dias e Simone Aparecida Vieira.

O cenário mais provável nas próximas décadas apresenta fortes modificações no meio ambiente global, incluindo aumento da concentração atmosférica de CO₂ e outros gases-traço, mudanças climáticas e intensificação dos impactos causados pela ação do homem. Essas mudanças podem causar importantes modificações na composição, estrutura e distribuição dos ecossistemas pelo planeta, portanto um monitoramento preciso das mudanças na biosfera terrestre é extremamente importante. A detecção da variabilidade interanual e das tendências de longo prazo na estrutura dos ecossistemas permitirá obter indicações de mudanças que, de outra forma, passariam despercebidas até o início da transformação do bioma. Dentre os ecossistemas planetários, um dos mais ameaçados é a floresta tropical, com a Mata Atlântica já praticamente devastada e a derrubada da Floresta Tropical Amazônica prosseguindo a uma taxa que varia entre 14 e 28 mil km² por ano. Neste cenário de desmatamentos e mudanças climáticas, o monitoramento da floresta tropical é importante para antecipar mudanças nesse ecossistema singular. Não apenas a área desflorestada deve ser monitorada, mas a

própria composição e estrutura da floresta devem ser monitoradas. A composição e estrutura de um ecossistema dependem basicamente da taxa de fixação de carbono e da sua taxa de mortalidade. A taxa de fixação de carbono de um ecossistema, ou produção primária líquida (NPP, em inglês), é o fluxo líquido de carbono da atmosfera para as plantas, e é igual à diferença entre a fotossíntese bruta (GPP, em inglês) e a respiração autotrófica dos ecossistemas (R_A), integrada ao longo do tempo. A NPP pode ser estimada por diversas metodologias, como medições de campo, sensoriamento remoto e modelagem. Nas medições de campo, os incrementos da biomassa viva (folhas, galhos, troncos e raízes) são monitorados ao longo do tempo. Esta metodologia é a mais tradicional, cara e trabalhosa, sendo geralmente utilizada em sítios experimentais de dimensões reduzidas. Suas estimativas pontuais são de utilidade limitada para estimativas regionais. Com isso, nossa proposta de trabalho foi desenvolver um algoritmo regional, chamado RATE, para monitoramento automático da taxa de fixação de carbono (NPP) pelos ecossistemas de Florestas Tropicais da América do Sul. Este algoritmo é baseado em dados de sensoriamento remoto do sensor MODIS (produtos MOD12Q1 e MOD15A2), dados meteorológicos da re-análise do NCEP/NCAR e modelagem. O produto de assimilação do Índice de Área Foliar (LAI, em inglês) e da Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FAPAR, em inglês), desenvolvido a partir dos dados do MOD15A2 para ser utilizado no algoritmo RATE, apresentou resultados adequados para os valores de LAI e FAPAR comparados com valores observados, gerando um banco de dados para a Floresta Amazônica superior ao produto original MOD15A2. Nos sítios de Floresta Amazônica, o Algoritmo RATE apresentou valores de NPP próximos aos observados, quando comparado às estimativas do produto de NPP do MODIS (MOD17A3), enquanto apresentou valores de NPP similares aos estimados pelo MOD17A3 para o sítio de Mata Atlântica. O Algoritmo RATE demonstrou ser confiável para a estimativa da taxa de fixação de carbono pelas

Florestas Tropicais para as condições específicas da América do Sul com um erro médio de 2,41%.

ABSTRACT

NUNES, Edson Luís, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, february, 2008. **Regional algorithm for monitoring the carbon assimilation by tropical forests of the South America.** Adviser: Marcos Heil Costa. Co-advisers: Pedro Leite da Silva Dias and Simone Aparecida Vieira.

The most likely scenario for the next decades presents strong modifications in the global environment, including increase of the atmospheric concentration of CO₂ and other trace gases, climate change and intensification of the impacts caused by the man's action. These changes may cause important modifications in the composition, structure and distribution of the ecosystems on the planet, therefore a precise monitoring of the changes in the terrestrial biosphere is extremely important. The detection of the interannual variability and long-term trends in the ecosystems structure and dynamics will allow obtaining indications of change that would otherwise be unnoticed until the beginning of the transformation of the biome. Among the planetary ecosystems, one of the more threatened is the South America tropical forest, with the Atlantic Forest nearly devastated and the Amazonian Tropical Forest deforestation continuing at a rate that varies between 14,000 and 28,000 km² a year. In this scenario of deforestation and climate change, the monitoring of the tropical forest is important to identify in advance changes in this unique ecosystem. Not just the deforested area should be monitored, but

the composition, structure and dynamics of the forest should be monitored. The composition and structure of an ecosystem depend basically on its dynamics, i.e., on the rate of fixation of carbon and on its mortality rate. The carbon fixation rate of an ecosystem, or net primary production (NPP), is the net flux of carbon from the atmosphere to the plants, and is the difference between the gross primary production (GPP) and the autotrophic respiration of the ecosystems (R_A), integrated through time. NPP can be estimated by several methodologies, like field measurements, remote sensing and modeling. In the field measurements, increments of the biomass (leaves, stems, trunks and roots) are monitored through time. This methodology is the most traditional, expensive and difficult, being usually used at experimental plots of reduced dimensions. Their estimates are of limited application for regional estimates. This work develops a regional algorithm, named RATE, for the automatic monitoring of the rate of fixation of carbon (NPP) by the Tropical Forests of South America. The algorithm is based on remote sensing data from the MODIS sensor (products MOD12Q1 and MOD15A2), meteorological data from the NCEP/NCAR reanalysis, and modeling. The assimilation of the MOD15A2 Leaf area index (LAI) and the Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) used in the RATE algorithm presented satisfactory results for the values of LAI and FAPAR, compared against observed values, generating a database for the Amazonian Forest superior than the original product MOD15A2. In the Amazonian Forest sites, the algorithm RATE presented values of NPP closer to the observed, when compared to the estimates of the MODIS NPP product (MOD17A3), while it presented values of NPP similar to the MOD17A3 for the Atlantic Forest site estimate. RATE demonstrated to be reliable for the estimate of the rate of fixation of carbon by Tropical Forests for the specific conditions of South America with an average error of 2.41%.

1. INTRODUÇÃO

O cenário mais provável nas próximas décadas apresenta fortes modificações no meio ambiente global, incluindo aumento da concentração atmosférica de CO₂ e outros gases-traço, mudanças climáticas e intensificação dos impactos causados pela ação do homem. É esperado que essas mudanças causem importantes modificações na composição, estrutura e distribuição dos ecossistemas pelo planeta. Desta forma, um monitoramento preciso das mudanças na biosfera terrestre tem se tornado extremamente importante, pois detectar a variabilidade interanual e as tendências de longo prazo na estrutura dos ecossistemas permitirá identificar antecipadamente mudanças na biosfera que, do contrário, passariam despercebidas até o início de uma transformação do bioma.

Dentre os ecossistemas planetários, um dos mais ameaçados é a floresta tropical. No caso da América do Sul, enquanto mais de 90% da Mata Atlântica nativa já foi dizimada (Figura 1), a derrubada da Floresta Tropical Amazônica prossegue a uma taxa que varia entre 14 e 28 mil km² por ano, de acordo com o monitoramento anual do programa PRODES/INPE (Figura 2).

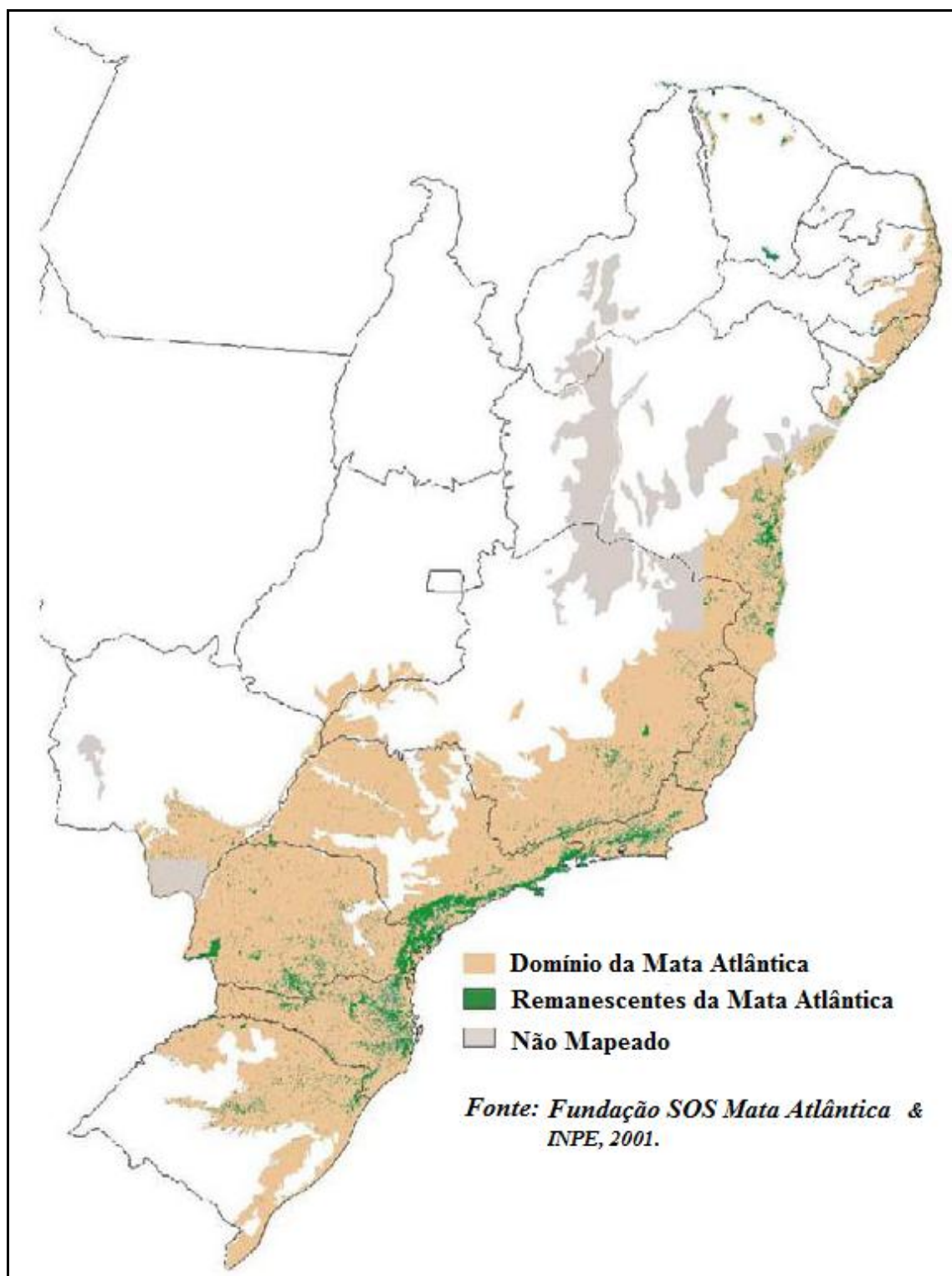


Figura 1. Áreas de Mata Atlântica Remanescentes.

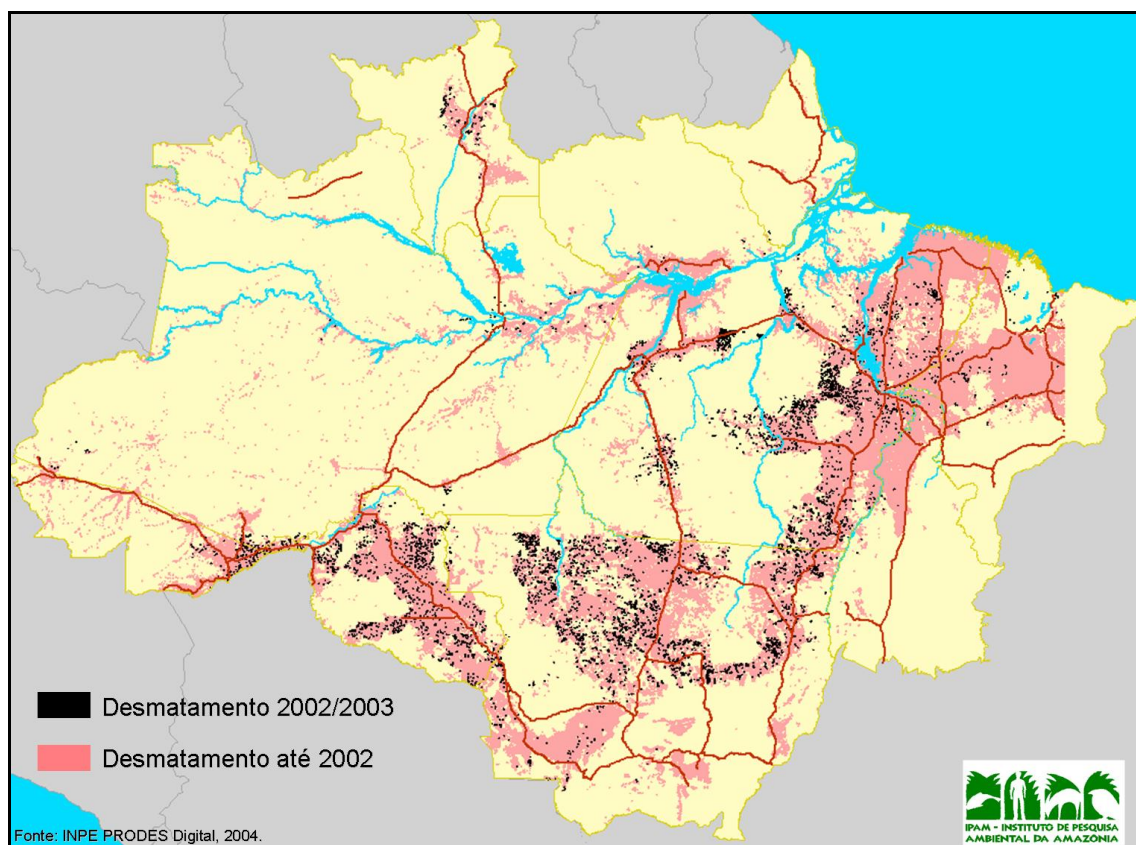


Figura 2. Áreas da Floresta Amazônica Desmatada.

Neste cenário de desmatamentos e mudanças climáticas, o monitoramento da floresta tropical é de fundamental importância para antecipar mudanças significativas neste ecossistema singular. Não apenas a área desflorestada deve ser monitorada, mas a própria composição e estrutura da floresta devem ser monitoradas.

A composição e estrutura de um ecossistema dependem basicamente da taxa de fixação de carbono e da sua taxa de mortalidade. A taxa de fixação de carbono em um ecossistema, ou produção primária líquida (NPP, em inglês, Net Primary Production), é o fluxo líquido de carbono da atmosfera para as plantas, e é igual à diferença entre a fotossíntese bruta (GPP, em inglês, Gross Primary Production) e a respiração autotrófica dos ecossistemas (R_A), integrada ao longo do tempo:

$$NPP = GPP - R_A \quad (1)$$

A NPP é sensível a vários fatores de controle, incluindo aspectos relacionados ao clima, topografia, solos, planta, características microbianas, distúrbios e impactos antropogênicos (FIELD et al., 1995).

A NPP pode ser estimada de diversas maneiras, sendo a metodologia mais tradicional as medições de campo em que os incrementos da biomassa (folhas, troncos e raízes) são monitorados ao longo do tempo. É uma metodologia cara e trabalhosa, e geralmente é utilizada em sítios experimentais de dimensões relativamente reduzidas. CLARK et al. (2001) sintetizaram resultados de estimativas da NPP obtidas em 39 sítios experimentais de floresta tropical espalhados por diversos países. Nesses sítios, o limite inferior das estimativas da NPP variou de 0,17 a 1,18 kg C m⁻² ano⁻¹, enquanto o limite superior variou de 0,31 a 2,17 kg C m⁻² ano⁻¹. No Brasil as estimativas foram de 0,67 a 0,92 kg C m⁻² ano⁻¹ (limite inferior) e de 1,22 a 1,68 kg C m⁻² ano⁻¹ (limite superior). Enquanto essas estimativas se referem à NPP total (soma da NPP acima da superfície, em inglês, Above ground NPP – ANPP e NPP abaixo da superfície, em inglês, Below

ground NPP – BNPP), CHAMBERS et al. (2001) calcularam que a média da ANPP para o planalto da Amazônia central é de pelo menos $0,65 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Entretanto, essas são estimativas pontuais e são de utilidade limitada para estimativas regionais ou para monitoramento no tempo. Para estas aplicações, técnicas alternativas para a estimativa da NPP, como o sensoriamento remoto, são mais adequadas (FIELD et al., 1995; RUNNING et al., 1999; RUNNING et al., 2004; ZHAO et al., 2005).

Lançado em 1999 a bordo do satélite Terra e novamente em 2002 a bordo do Aqua, o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) foi projetado para tornar-se o mais importante sensor remoto de monitoramento ambiental global, porque vê a superfície da Terra inteira a cada 1-2 dias adquirindo dados em 36 faixas espectrais. O uso de imagens de média resolução (250 a 1000 m), o georreferenciamento automático e a correção prévia para aerossóis atmosféricos facilitaram sobremaneira o uso dessas imagens em relação aos tradicionais sensores remotos de alta resolução, como Landsat, SPOT e IKONOS, não apenas pela distribuição gratuita das imagens, como também pela facilidade de uso.

Um dos produtos de monitoramento ambiental do MODIS é justamente o produto de NPP, que se baseia na relação apresentada pelas Equações (1) e (2), primeiramente proposta por MONTEITH (1972), que apresenta a GPP proporcional ao produto da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (APAR, em inglês, Absorbed Photosynthetically Active Radiation) e o fator de proporcionalidade chamado de eficiência de uso da luz (LUE, em inglês, Light Use Efficiency):

$$\text{GPP} = \text{LUE} \cdot \text{APAR} \quad (2)$$

onde $\text{APAR} = \text{PAR}_i \cdot \text{FAPAR}$, PAR_i é a radiação fotossinteticamente ativa incidente e FAPAR é a fração da radiação fotossinteticamente ativa que é absorvida pelo dossel. No

algoritmo de NPP do MODIS, PAR_i é obtida através da assimilação de radiação incidente do Global Modeling and Assimilation Office, do NASA Goddard Space Flight Center (GMAO/GSFC/NASA). FAPAR, que é diretamente correlacionada com o teor de clorofila do dossel, é um dos produtos do próprio MODIS (MOD15), produzido com uma resolução espacial de 1 km, enquanto a R_A e a LUE são obtidas por meio de simples relações, baseadas no modelo BIOME-BGC. A R_A é obtida utilizando dados de Índice de Área Foliar (LAI, em inglês, Leaf Area Index), temperatura e uma taxa básica de respiração. A LUE pode ser obtida a partir de algoritmos de modelos mecanísticos que empregam a LUE máxima (LUE_m) como parâmetro de campo e estressores ambientais que reduzem fisiologicamente a LUE (FIELD et al., 1995; TURNER et al., 2003 e XIAO et al., 2005).

LAI e FAPAR ($0,4 - 0,7 \mu m$) são dois dos vários produtos geofísicos que são operacionalmente produzidos a partir do próprio MODIS. Eles são produtos necessários para se descrever a troca de fluxos de energia, massa (água e CO_2) e momentum entre superfície e atmosfera (SELLERS et al., 1997).

Embora a maioria dos produtos terrestres do MODIS ainda esteja em fase de validação, alguns resultados preliminares começam a emergir. No caso da floresta tropical, como fruto de uma colaboração entre a Oregon State University e a Universidade Federal de Viçosa (UFV), três artigos oferecem uma avaliação preliminar dos produtos: SENNA et al. (2005), COHEN et al. (2006) e TURNER et al. (2006) validaram os produtos de FAPAR, cobertura do solo, LAI e NPP do MODIS para diversos ecossistemas, incluindo a floresta tropical.

Em um estudo feito em dois sítios dentro da Floresta Nacional (Flona) de Tapajós em Belterra-PA, SENNA et al. (2005), comparando estimativas de FAPAR baseadas em medidas de campo, modelagem e sensoriamento remoto, verificaram que as medidas de campo de FAPAR para uma floresta tropical úmida, corrigidas para

incluir somente a absorção de PAR_i pelas folhas, concordam com as estimativas de FAPAR do MODIS.

COHEN et al. (2006) verificaram que o produto de cobertura do solo do MODIS acertou em 100% dos pixels ao identificar a cobertura do solo no caso do sítio de floresta tropical, e que o produto de LAI demonstrou ser muito instável, com os valores médios geralmente variando entre 3 e 6, enquanto os valores médios estimados para este sítio foram entorno de 6.

TURNER et al. (2006) verificaram problemas no algoritmo de estimativa de NPP do MODIS, em um sítio de floresta tropical (TAPA) localizado na Flona de Tapajós em Belterra-PA. Para o ano de 2004, o algoritmo do MODIS apresentou resultados de estimativa de NPP quase 50% inferiores aos valores obtidos em campo (projeto BigFoot), com notável sub-estimativa da LUE.

Considerando o exposto, da mesma maneira que se buscou produzir um produto de previsão numérica do tempo específico para a América do Sul – embora produtos globais de previsão do tempo estivessem disponíveis – o objetivo deste trabalho é desenvolver um algoritmo regional para monitoramento automático da taxa de fixação de carbono pelos ecossistemas terrestres de florestas tropicais (RATE, em inglês, Regional Algorithm for Monitoring the Carbon assimilation by Terrestrial Ecosystems). Um algoritmo baseado em dados de sensoriamento remoto a partir dos produtos do sensor MODIS, dados meteorológicos assimilados e modelagem, algoritmo esse específico para as condições da América do Sul.

De forma específica, este trabalho tem como objetivos:

- (a) Desenvolver um algoritmo para cálculo da NPP, em função de variáveis meteorológicas assimiladas a partir de dados de re-análise do NCEP/NCAR e dos produtos de cobertura do solo, FAPAR e LAI do MODIS (resolução de 0,40°);

- (b) Calibrar esse algoritmo usando dados de NPP coletados em um sítio na floresta amazônica e validá-lo usando dados de NPP coletados em quatro sítios de floresta tropical, sendo três de floresta amazônica e um de mata atlântica;
- (c) Quantificar o erro introduzido na estimativa ao se usar variáveis meteorológicas assimiladas, ao invés de variáveis coletadas localmente;
- (d) Realizar um estudo de caso sobre a NPP para as florestas tropicais na América do Sul, para o período de 2000 a 2006.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do Algoritmo RATE

O algoritmo proposto para monitoramento e quantificação da NPP pelos ecossistemas terrestres de Florestas Tropicais da América do Sul (Figura 3) foi implementado a partir de dados de sensoriamento remoto de resolução moderada de cobertura do solo, LAI e FAPAR do MODIS, de dados de variáveis meteorológicas de re-análise fornecidos pelo NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research), e de um modelo mecanístico pontual de produtividade fotossintética, SITE (modelo de ecossistema tropical simples, em inglês, Simple Tropical Ecosystem Model).

Esse modelo foi alterado para operar em escala regional com uma grade de 0,40 graus e para ser forçado por variáveis meteorológicas de radiação de onda curta incidente (S_{in}), radiação de onda longa incidente (L_{in}), temperatura do ar (T_a), umidade específica do ar (q_a), velocidade horizontal do vento (u_a), precipitação (P) e pressão atmosférica (P_a) assimiladas a partir de dados de re-análise do NCEP/NCAR, e por dados de cobertura do solo, LAI e FAPAR assimilados dos produtos do MODIS, MOD12Q1 – Coleção 4 – para dados anuais de cobertura do solo com uma resolução

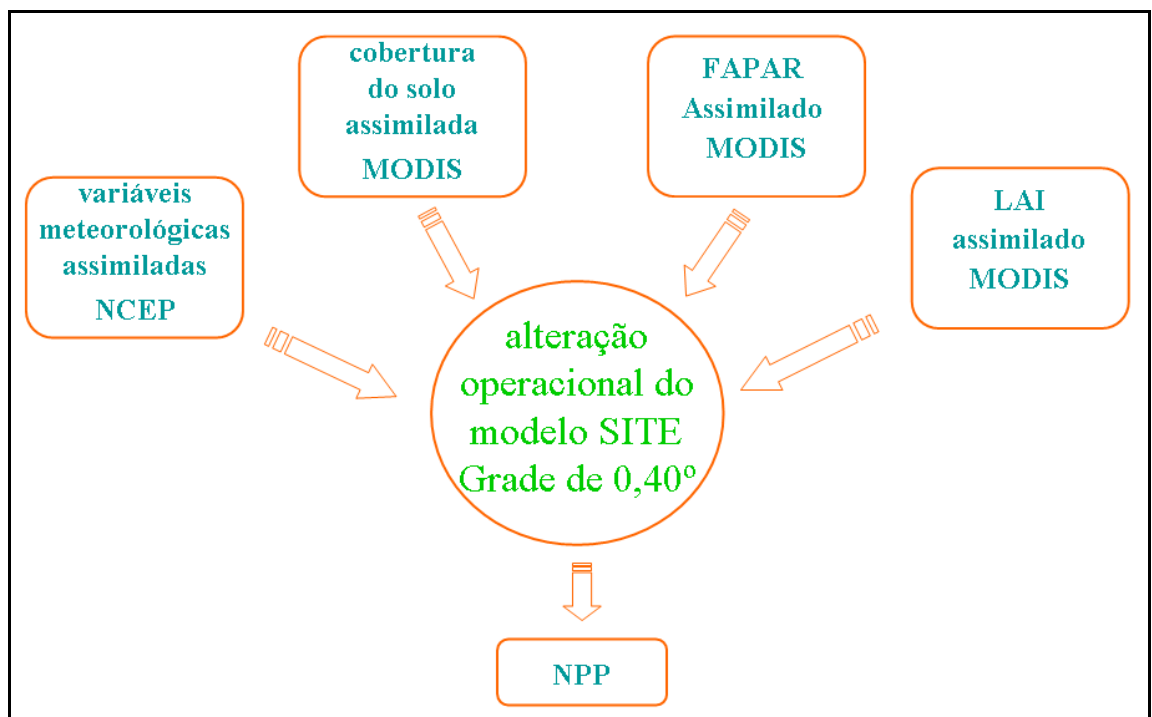


Figura 3. Fluxograma do algoritmo RATE.

espacial de 1 km e MOD15A2 – Coleção 4 – para dados de 8 em 8 dias de LAI e FAPAR com uma resolução espacial de 1 km.

O algoritmo implementado é capaz de fornecer estimativas temporais e espaciais da taxa de fixação de carbono, de 8 em 8 dias, com 0,40 graus de resolução espacial, para o ecossistema de florestas tropicais da América do Sul.

2.1.1. Modelo SITE

O SITE é um modelo simplificado de dinâmica de vegetação de ecossistema tropical, desenvolvido por SANTOS e COSTA (2004), que incorpora vários processos: balanço de radiação solar e infravermelha, processos aerodinâmicos, fisiologia vegetal e transpiração do dossel, balanço de água interceptada pelo dossel, transporte de massa e energia na atmosfera, fluxo de calor e água no solo e balanço de carbono, mas que possui a complexidade necessária para representar os processos fisiológicos envolvidos com o ciclo do carbono (Figura 4).

O modelo foi codificado em Fortran 77, apresentando aproximadamente 1450 linhas de código. É um modelo pontual, que em sua última versão (Site1.1-0d) usa um intervalo de integração (dt) de uma hora, representando um ponto de terreno totalmente coberto por uma floresta tropical perene de folhas largas. Pequenas modificações podem ser necessárias para representar outros ecossistemas tropicais.

O SITE é um modelo estruturado com uma camada de dossel e duas camadas no solo (Figura 5), onde a primeira camada é próxima à superfície do solo com uma profundidade de até 10 cm e a segunda, onde se encontram distribuídas as raízes, com uma profundidade de até 5 m. O modelo é forçado com base nos dados médios horários das observações meteorológicas das variáveis de temperatura do ar, umidade específica do ar, velocidade horizontal do vento, radiação de onda curta incidente, radiação de onda longa incidente e precipitação, medidos acima do dossel.

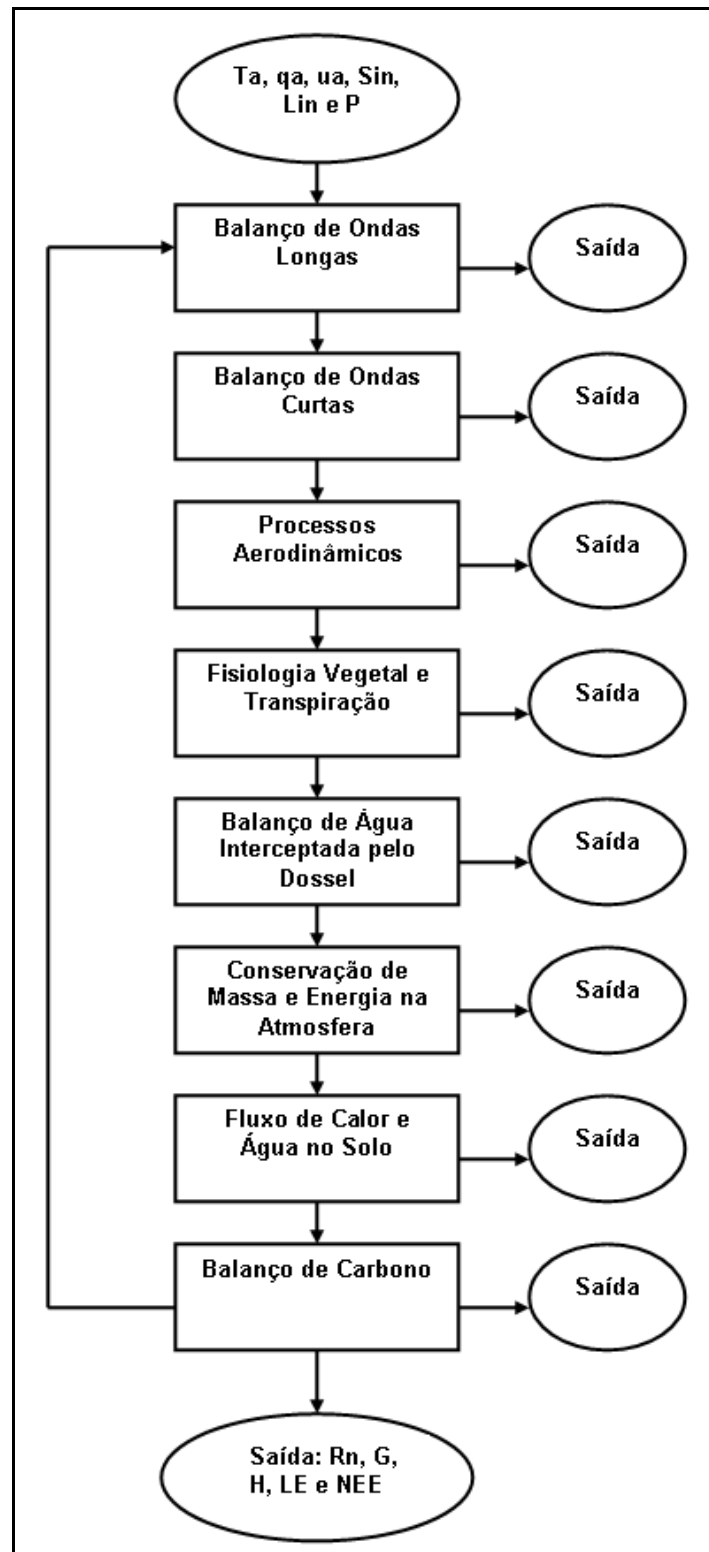


Figura 4. Fluxograma do modelo SITE.

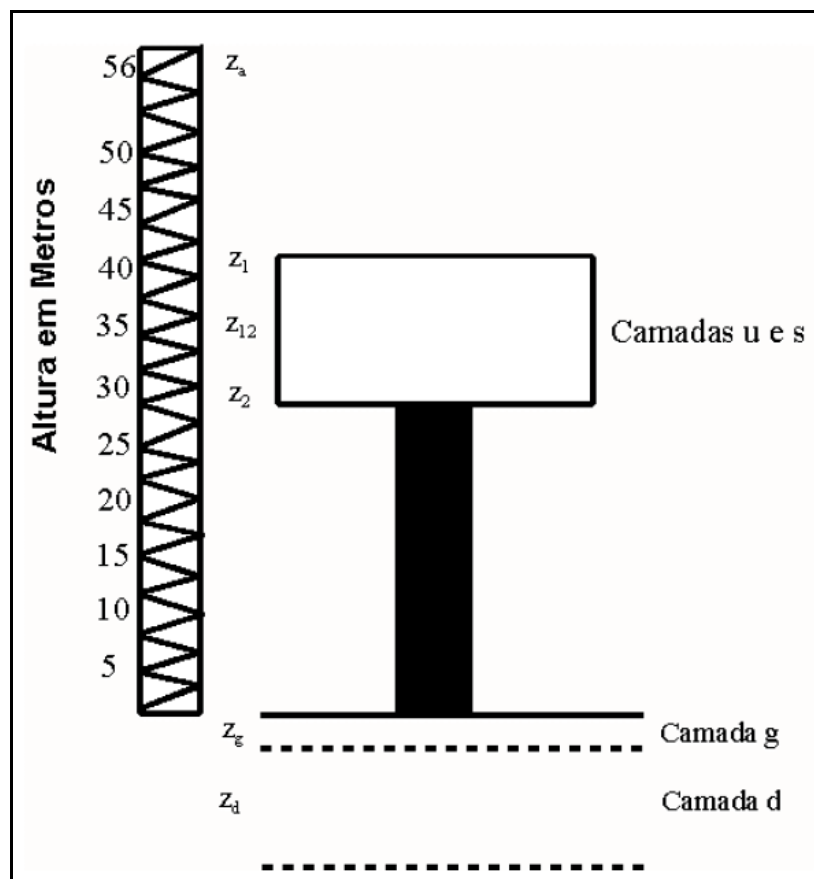


Figura 5. Representação esquemática do modelo. **u**, **s**, **g** e **d**, referem-se às folhas, galhos, camada superficial do solo e camada profunda do solo, respectivamente.

2.1.2. Cobertura do Solo

Para se trabalhar com os dados dos produtos do MODIS é importante compreender o sistema único de projeção e mosaico (tiles) e o formato de arquivo adotado para todos os produtos do MODIS Terra.

Todos os produtos do MODIS utilizam a projeção Integerized Sinusoidal (ISIN) em uma grade de 10°, onde todo o globo é visualizado em um mosaico contendo 36 tiles ao longo do eixo leste-oeste, e 18 tiles ao longo do eixo norte-sul (Figura 6), cada tile com aproximadamente 1200 x 1200 quilômetros.

A partir da Coleção 4 de dados dos produtos do MODIS a projeção adotada é a Senoidal (SIN). Em uma resolução espacial de 1 km, a diferença entre as projeções SIN e ISIN é desprezível. A decisão para mudar da projeção ISIN para a SIN foi tomada para tornar os dados mais compatíveis com os softwares de processamento de imagem atuais.

Para muitas aplicações, pode ser conveniente re-projetar os dados do MODIS da projeção ISIN ou SIN para uma projeção diferente mais apropriada à área de interesse. Poucos softwares de processamento de imagem ou sistema de informação geográfico (SIG) têm a capacidade para re-projetar dados do MODIS a partir da projeção ISIN. Porém, há boas ferramentas que são fáceis de serem obtidas e estão disponíveis livremente. Uma dessas ferramentas, usadas atualmente para re-projetar dados do MODIS em ambos os formatos, isto é ISIN e SIN, é a ferramenta de re-projeção do próprio MODIS (MRT, em inglês, MODIS Reprojection Tool).

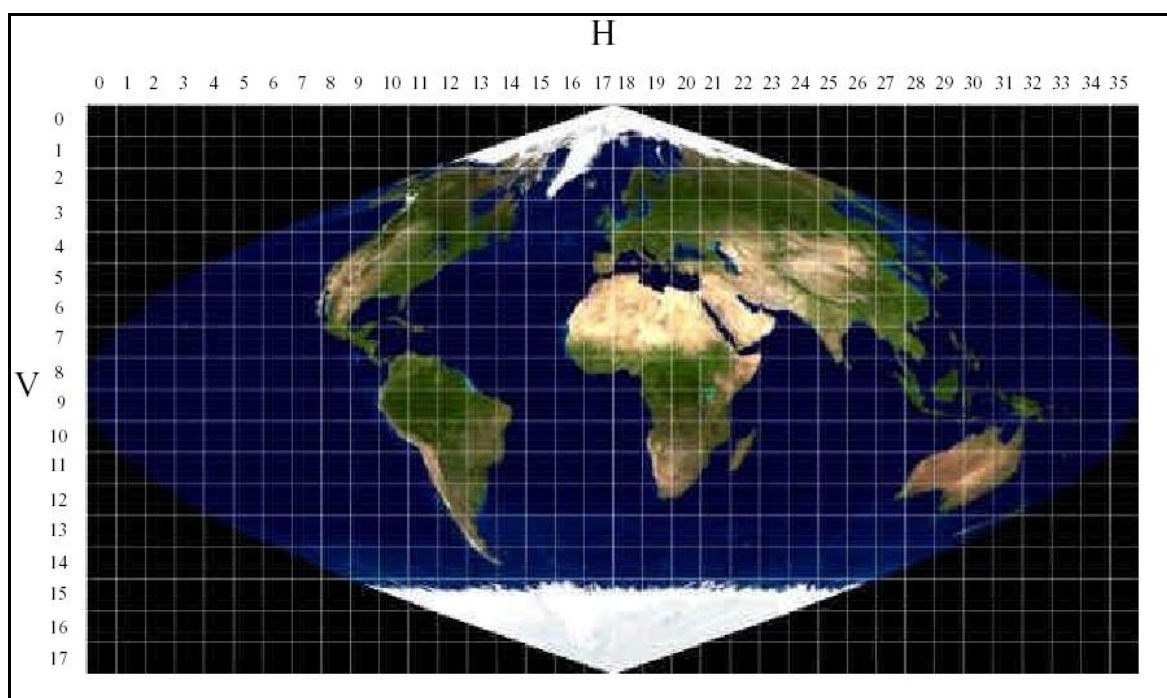


Figura 6. Sistema de mosaico (tiles) do MODIS. Qualquer localização na superfície da Terra pode ser espacialmente referenciada usando os indicadores horizontais (H) e Verticais (V). Cada tile tem 1200 x 1200 quilômetros.

Todos os produtos biofísicos da NASA são arquivados no formato de dados HDF-EOS. O HDF-EOS é baseado no formato de dados hierárquico desenvolvido pelo NCSA (National Center for Supercomputer Application) na Universidade de Illinois – Urbana-Champaign. O Formato HDF-EOS tem a vantagem de arquivar dados em múltiplas camadas e informações de apoio (como características de projeção, fator de escala, tempo e data de produção, etc.) em um único arquivo. A desvantagem é que para se usar os dados armazenados em uma camada de dados é preciso utilizar uma ferramenta apropriada para extrair os dados desejados da "pilha" de camadas de dados, sendo o MRT também uma ferramenta adequada para este propósito. Além disso, existem diversas ferramentas e sistemas de software que permitem ao usuário olhar as várias camadas de dados dentro de um determinado arquivo de HDF-EOS.

O objetivo principal do parâmetro de cobertura do solo é facilitar a inferência de informação biofísica da cobertura do solo para uso em estudos de modelagem regional e global. Assim, as unidades de classificação específicas da cobertura do solo necessitam não somente serem discerníveis com alta precisão a partir de dados de sensoriamento remoto e dados auxiliares, mas também precisam ser diretamente relacionadas às características físicas da superfície e principalmente às características da vegetação da superfície. Um conjunto global de 17 classes de cobertura do solo foi desenvolvido pelo IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) especificamente para este propósito (BELWARD, 1996). Desde que o sistema IGBP de unidades (Tabela 1) foi desenvolvido para um produto global de cobertura do solo em uma resolução de 1 km com o propósito de fornecer parametrizações biofísicas para modelagem, essa classificação também passou a ser usada para o produto de cobertura do solo do MODIS (MOD12Q1).

Tabela 1. Unidades de cobertura do solo do IGBP.

Vegetação Natural	
Florestas Coníferas Perenes	Solos dominados por vegetação lenhosa com um percentual de cobertura >60% e altura excedendo a 2 m. Quase todas as árvores permanecem verdes por todo o ano. A cobertura das árvores nunca fica sem folhagem verde.
Florestas de Folhas Largas Perenes	Solos dominados por vegetação lenhosa com um percentual de cobertura >60% e altura excedendo a 2 m. Quase todas as árvores e arbustos permanecem verdes por todo o ano. A cobertura das árvores nunca fica sem folhagem verde.
Florestas Coníferas Decíduas	Solos dominados por vegetação lenhosa com um percentual de cobertura >60% e altura excedendo a 2 m. Consiste de comunidades de árvores coníferas sazonais com um ciclo anual de períodos com folhas e sem folhas.
Florestas de Folhas Largas Decíduas	Solos dominados por vegetação lenhosa com um percentual de cobertura >60% e altura excedendo a 2 m. Consiste de comunidades de árvores de folhas largas com um ciclo anual de períodos com folhas e sem folhas.
Florestas Mistas	Solos dominados por árvores com um percentual de cobertura >60% e altura excedendo a 2 m. Consiste de comunidades de árvores com misturas intercaladas ou mosaicos de quatro outros tipos de florestas. Nenhum dos tipos de floresta excede 60% da cobertura do solo.
Arbustos Fechados	Solos com vegetação lenhosa com menos de 2 metros de altura e com cobertura de arbusto cobrindo >60% do solo. A folhagem de arbusto pode ser perene ou decídua.
Arbustos Abertos	Solos com vegetação lenhosa com menos de 2 metros de altura e com cobertura de arbusto cobrindo entre 10 e 60% do solo. A folhagem de arbusto pode ser perene ou decídua.
Savanas Lenhosas	Solos com sistemas herbáceos e pequenas árvores, e com a cobertura da floresta cobrindo entre 30 e 60% do solo. A altura da cobertura da floresta excede 2 metros.
Savanas	Solos com sistemas herbáceos e pequenas árvores, e com a cobertura da floresta cobrindo entre 10 e 30% do solo. A altura da cobertura da floresta excede 2 metros.
Gramados (Estepes/Pampas)	Solos com tipos herbáceos de cobertura. Árvores e arbustos cobrindo menos de 10% do solo.
Solos Permanentemente Alagados	Solos com uma mistura permanente de água e herbáceos ou vegetação lenhosa. A vegetação pode estar presente dentro de água salgada, salobra, ou doce.
Solos Trabalhados e Mosaicos	
Culturas Agrícolas	Solos cobertos com culturas temporárias seguidas por colheita e um período de solo nu (sistemas de cultivo único ou múltiplo). As culturas lenhosas perenes serão classificadas como floresta ou arbusto.
Áreas Urbanas e Construções	Solo coberto por construções e outras estruturas feitas pelo homem.
Culturas Agrícolas / Mosaicos de Vegetação Natural	Solos com um mosaico de culturas agrícolas, florestas, arbustos, e campos em que nenhum dos componentes ocupa mais que 60% da cobertura do solo.
Solos Não Vegetados	
Neve e Gelo	Solos cobertos com neve e gelo ao longo do ano.
Solo Descoberto	Solos com solo exposto, areia, pedra, ou neve e nunca tem mais que 10% da cobertura do solo vegetada durante qualquer período do ano.
Corpos de Água	Oceanos, mares, lagos, reservatórios, e rios. Pode ser corpos com água doce ou salgada.

As classes do IGBP podem ser re-classificadas para se tornarem compatíveis com sistemas atuais e futuros usados pela comunidade de modelagem. A Tabela 2 fornece um exemplo no qual as classes do IGBP são re-classificadas para três outros esquemas: para o SiB2 (SELLERS et. al, 1996) que é um modelo de interação superfície-atmosfera para uso em modelos climáticos globais (GCMs); para a classificação de RUNNING e NEMANI (NEMANI e RUNNING, 1996; RUNNING et. al., 1994; RUNNING et al., 1995) que é principalmente planejada para a parametrização de modelos globais do ciclo de carbono e de nutrientes; e para a classificação de MYNENI (MYNENI et. al, 1997) que é usada na modelagem de transferência radiativa para os produtos de LAI e FAPAR do MODIS. Para todas as classes nestes esquemas, há uma ligação direta com uma ou mais classes do IGBP. Um problema surge quando algumas classes do IGBP não têm classes equivalentes nestes esquemas. Por exemplo, áreas de solo alagado e urbanizadas não aparecem dentro destes três esquemas (Tabela 2), presumivelmente porque elas não são reconhecidas pelos modelos como um tipo de cobertura do solo. Porém, estas classes podem ser bastante importantes para modelos de emissão de gases traço, por exemplo. A estratégia do IGBP foi reconhecer as classes que seriam mais úteis para todas as disciplinas de modelagem.

2.1.2.1. Produto de Assimilação da Cobertura do Solo

Para se implementar um produto específico para a América do Sul foi necessário trabalhar com uma composição dos produtos do MODIS que pudesse cobrir toda a América do Sul. Para isso, foi necessário concatenar 31 tiles dos produtos do MODIS em um único arquivo (Figura 7).

Tabela 2. Comparações de classificação.

Classificação			
IGBP	SiB2	Running & Nemani	Myneni
Objetivo			
Modelo Geral de Parametrização	Interações de Superfície em GCMs	Ciclo de Carbono e de Nutrientes	Transferência Radiativa para LAI e FPAR
Classes			
Florestas Coníferas Perenes	Árvores Coníferas-Perenes (4)	Coníferas Perenes	Florestas Coníferas
Florestas Coníferas Decíduas	Árvores Coníferas-Decíduas (5)	Coníferas Decíduas	Florestas Coníferas
Florestas de Folhas Largas Perenes	Árvores de Folhas Largas-Perenes (1)	Folhas Largas-Perenes	Florestas de Folhas
Florestas de Folhas Largas Decíduas	Árvores de Folhas Largas-Decíduas (2)	Folhas Largas-Decíduas	Florestas de Folhas
Florestas Mistas	Árvores de Folhas Largas e Coníferas (3)		
Savanas Lenhosas	Gramínea C-4 (6)	Savanas	Savana
Savanas		Savanas	Savana
Gramados (Estepes/Pampas)		Relva	Relva/Cultura de Cereais
Arbustos Fechados	Pequenas Árvores e Arbustos (8)		Arbustos
Arbustos Abertos	Arbustos com Solo Nu (7)		Arbustos
Culturas Agrícolas	Agricultura (9)		Culturas de Folhas Largas
Culturas Agrícolas / Mosaicos de Vegetação Natural			
Solos Permanentemente Alagados			
Áreas Urbanas e Construções			

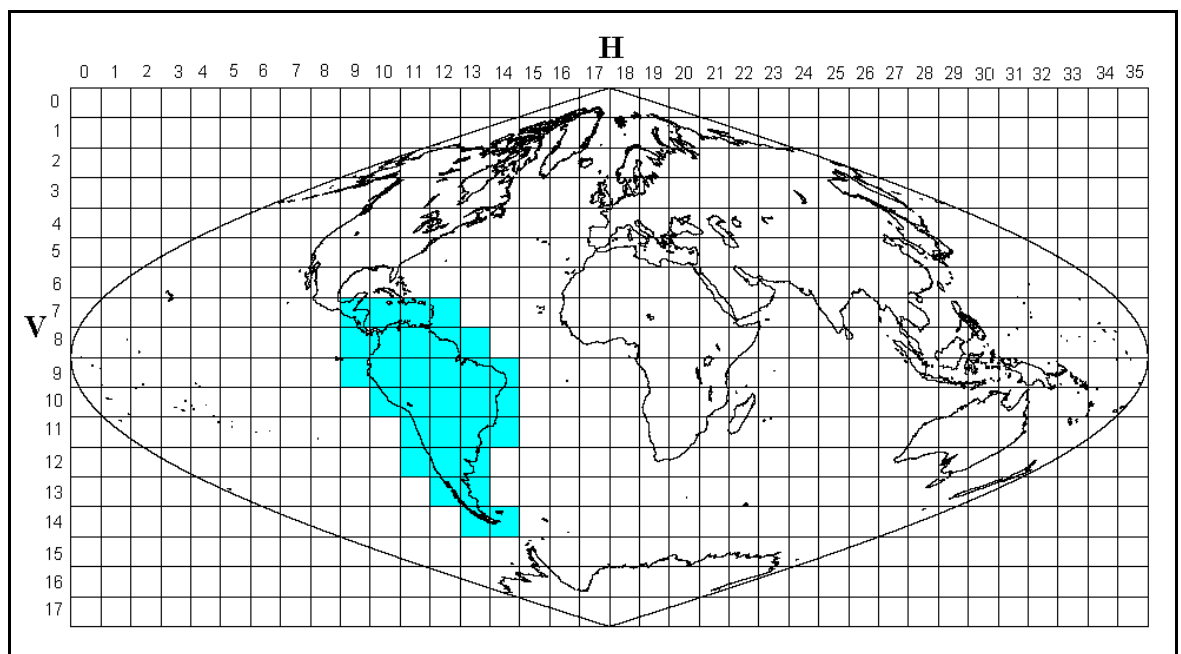


Figura 7. Composição de 31 tiles do MODIS necessária para cobrir toda a América do Sul.

Para o produto de cobertura do solo do MODIS (MOD12Q1) foi usado o MRT para concatenar os 31 tiles, inicialmente com uma resolução espacial de 1 km na projeção SIN, e convertê-los para a projeção em coordenadas geográficas com resolução espacial de 0,01° e 0,40° utilizando a interpolação pelo vizinho mais próximo.

Foi utilizado um simples script em NCL (NCAR Command Language) para converter os arquivos do MOD12Q1 obtidos para as resoluções espaciais de 0,01° e 0,40° no formato HDF-EOS para o formato netCDF (network Common Data Form), formato de arquivo de dados que suporta a criação, acesso, e compartilhamento de dados científicos armazenados vetorialmente.

Utilizando uma ferramenta específica desenvolvida em Fortran 77 para trabalhar os dados do MOD12Q1 com resolução espacial de 0,01° e 0,40° no formato netCDF, foi obtido o produto de assimilação para a cobertura do solo com uma resolução espacial de 0,40° para a América do Sul, contendo, em um único arquivo no formato netCDF, os dados com os pixels de Floresta Tropical e os dados com a frequência de ocorrência do bioma em cada pixel para o ecossistema de Floresta Tropical.

Para o algoritmo RATE foram considerados apenas os pixels de Floresta Tropical com a frequência de ocorrência do bioma maior ou igual a 60%.

2.1.3. LAI e FAPAR (MOD15A2)

O algoritmo do MODIS usado para gerar o produto de LAI e FAPAR a partir das refletâncias da superfície corrigidas atmosféricamente (MOD15A2), com uma resolução espacial de 1 km e uma resolução temporal de 8 dias, consiste de um algoritmo principal que explora as informações contidas nas superfícies de refletância do MODIS em 7 faixas espectrais. Na falha do algoritmo principal, um algoritmo de suporte (secundário) é ativado para calcular LAI e FAPAR (Figura 8) usando a relação com o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI, em inglês, Normalized Difference

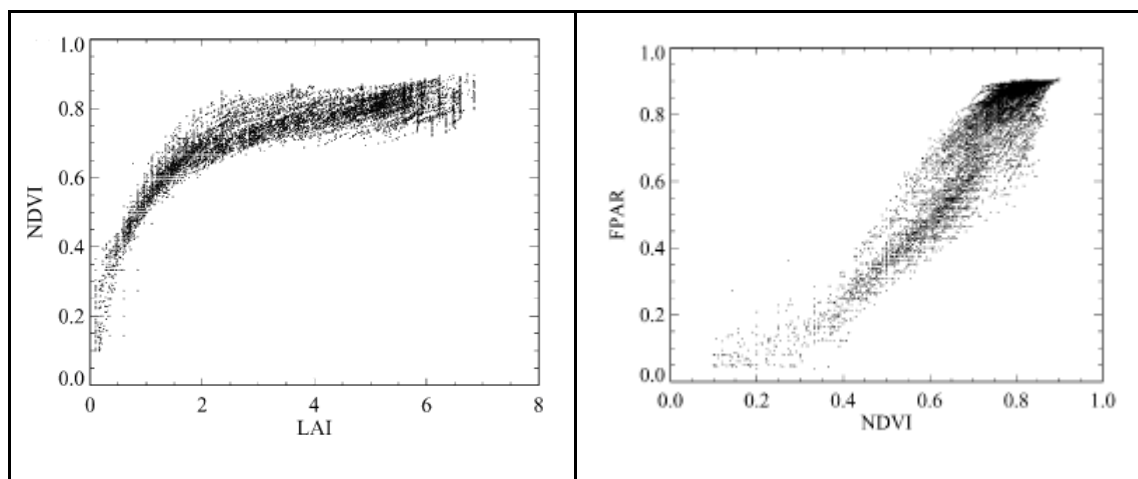


Figura 8. (a) Relação entre NDVI e LAI e (b) relação entre FAPAR e NDVI.

Vegetation Index), onde NDVI é descrito de acordo com a Equação 3. O algoritmo requer uma classificação de cobertura de solo que seja compatível com o modelo de transferência radiativa usado na sua implementação (MYNENI et. al, 1997). Tal classificação é baseada na estrutura da vegetação e no produto de cobertura do solo do próprio MODIS. Logo, o algoritmo de LAI e FAPAR do MODIS tem interfaces com o produto de refletância do MODIS (MOD09) e o produto de cobertura do solo do MODIS (MOD12).

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (3)$$

Onde ρ_{IVP} é a refletância no infravermelho próximo e ρ_V é a refletância no vermelho.

2.1.3.1. Produto de Assimilação de LAI e FAPAR

Da mesma forma que se trabalhou o produto de cobertura do solo do MODIS para se obter uma composição da América do Sul com uma resolução espacial de 0,01° e 0,40° em um formato netCDF, trabalhou-se no produto de LAI e FAPAR do MODIS (MOD15A2) com uma resolução espacial de 1 km e uma resolução temporal de 8 dias, iniciando a aquisição de dados em 26 de fevereiro de 2000 e terminando em 06 de março de 2007.

Utilizando uma ferramenta específica desenvolvida em Fortran 77 para manipular os dados de LAI e FAPAR do MOD15A2, com resolução espacial de 0,01° e 0,40° no formato netCDF, foi obtido o produto de assimilação de LAI e FAPAR para a América do Sul a partir dos valores máximos de LAI e FAPAR para Floresta Tropical em uma grade de 0,40° e da correção por um fator obtido em função do erro observado. Esse produto que teve como principal objetivo a mitigação da perda de dados do produto MOD15A2 devido à falha do algoritmo do MODIS para os produtos de LAI e FAPAR em regiões com grande incidência de cobertura de nuvens.

2.1.4. Variáveis Meteorológicas de Re-análise

A assimilação de dados meteorológicos para inicializar modelos de previsão do tempo é um processo realizado por todos os centros de previsão numérica do tempo. Consiste da coleta de dados a partir de estações meteorológicas de superfície, aviões, navios, balões-sonda e imagens de satélite e seu processamento por um software específico.

A utilização de dados meteorológicos assimilados para inicializar e executar modelos numéricos de previsão do tempo permitiu a criação de um produto eficiente para gerar séries históricas das variáveis meteorológicas, chamado de re-análise. A técnica de re-análise atmosférica processa, simultaneamente, uma grande variedade de observações, usando as leis físicas contidas nos modelos de previsão do tempo. Sendo assim, o histórico do estado atmosférico pode ser reconstruído dinamicamente de forma a atender às necessidades das comunidades de pesquisa e monitoramento do clima (KALNAY et al., 1996).

Segundo PINTO (2007), entre os produtos de re-análise mais utilizados encontram-se os gerados pelos centros NCEP/NCAR e ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast). Recentemente, o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibilizou um produto novo de re-análise regional ainda em fase de validação e com uma série temporal de dados pequena, cobrindo o período de 2000 a 2004.

2.1.4.1. Produto de Assimilação das Variáveis Meteorológicas

Para gerar o produto de assimilação das variáveis meteorológicas foi utilizado o produto de re-análise do NCEP/NCAR para variáveis meteorológicas adquiridas para o período de 01 de janeiro de 2000 até 01 de março de 2007 com intervalos de tempo de 6 em 6 horas.

Foram adquiridas as variáveis meteorológicas de re-análise do NCEP/NCAR referentes à radiação de onda curta incidente, radiação de onda longa incidente e precipitação com uma resolução espacial de $1,9^\circ$, e referentes à temperatura, umidade relativa, componentes horizontais da velocidade do vento (u e v) e pressão com uma resolução espacial de $2,5^\circ$.

Utilizando uma ferramenta específica desenvolvida em Fortran 77 para trabalhar os dados meteorológicas de re-análise do NCEP/NCAR no formato netCDF, foi obtido o produto de assimilação para as variáveis meteorológicas com uma resolução espacial de $0,40^\circ$ para a América do Sul utilizando uma interpolação bi-linear, que gerou campos de variáveis meteorológicas de radiação de ondas longas, radiação de ondas curtas, precipitação, temperatura do ar, umidade específica do ar, velocidade horizontal do vento e pressão atmosférica para a América do Sul.

O algoritmo RATE interpola linearmente os valores dos campos do produto de assimilação das variáveis meteorológicas para obter valores com intervalos de 1 em 1 hora, pois o algoritmo RATE tem em seu núcleo de operação o modelo SITE trabalhando com um intervalo de integração de uma hora.

2.2. Calibração, Validação e Comparação do Algoritmo RATE

Para calibração e validação do algoritmo RATE foram utilizados dados de medidas de campo dos sítios experimentais de floresta tropical KM67 ($55,024^\circ$ W; $2,863^\circ$ S), ZF-2 ($60,183^\circ$ W; $2,967^\circ$ S), UFAC ($68,033^\circ$ W; $10,117^\circ$ S), SINOP ($55,325^\circ$ W; $11,412^\circ$ S) e BA712 ($39,673^\circ$ W; $17,287^\circ$ S), com suas localizações visualizadas na Figura 9.

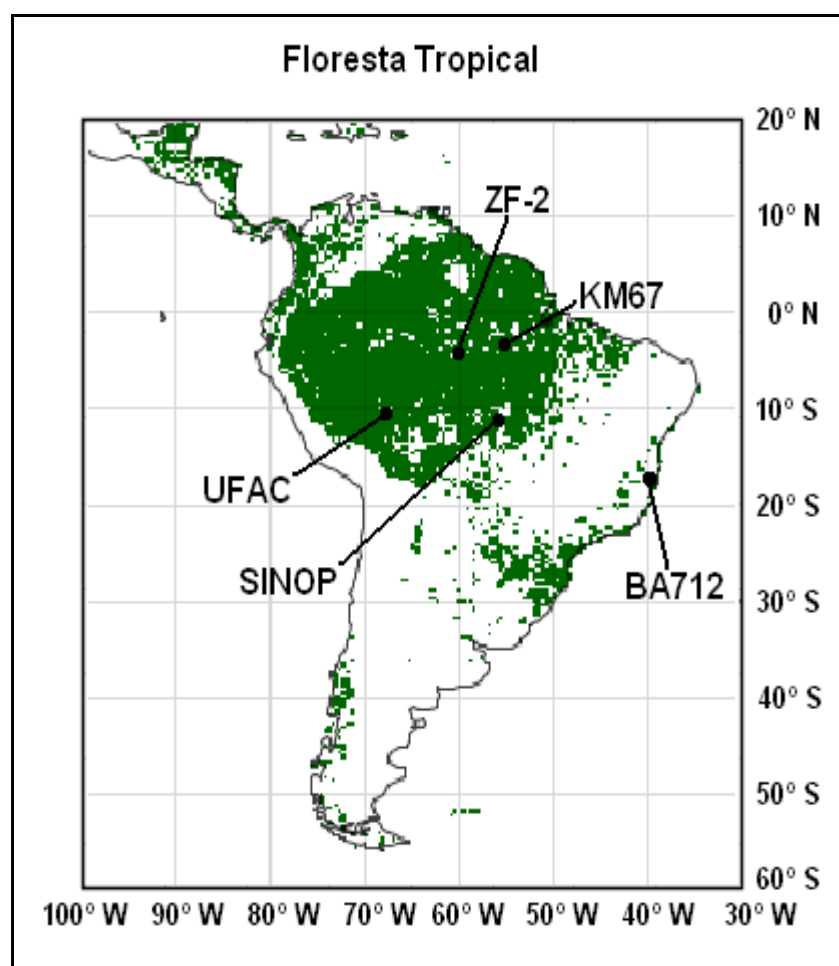


Figura 9. Localização dos sítios experimentais.

Com os dados de medidas de campo dos sítios experimentais de floresta tropical, obtidos conforme o descrito nos subitens a seguir, foi realizado: a calibração do modelo SITE com dados do sítio KM67; a calibração do algoritmo de assimilação de LAI e FAPAR com dados dos sítios KM67 e SINOP; a quantificação do erro introduzido nas estimativas ao se usar variáveis assimiladas, ao invés de variáveis coletadas localmente, com dados dos sítios KM67 e BA712; a validação dos dados de NPP do algoritmo RATE com dados dos sítios KM67, ZF-2, UFAC e BA712; e a comparação dos resultados do algoritmo RATE com dados de NPP do MODIS (MOD17A3) para os sítios KM67, ZF-2, UFAC e BA712.

2.2.1. Medidas de Campo

2.2.1.1. Sítio KM67

No sítio instalado na Floresta Nacional de Tapajós, contendo aproximadamente 600.000 ha de floresta tropical perene, localizado no município de Belterra-PA, Brasil, à margem da rodovia Santarém-Cuiabá, próximo ao km 67 desta rodovia (Sítio KM67), foram obtidos dados de campo fornecidos pelo projeto LBA (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia) para o período de 2002 a 2004.

Neste sítio, foram feitas medidas de dados meteorológicos e de fluxos – calor sensível (H), calor latente (LE) e troca líquida de CO₂ do ecossistema (NEE) – a partir de sensores instalados em uma torre. Para medidas de biomassa de folhas mortas e incremento de biomassa dos troncos e raízes, havia instalado no sítio 4 “transects”, sendo que 3 eram compostos por 10 parcelas com 5 sub-parcelas cada uma e 1 “transect” composto por 20 parcelas com 5 sub-parcelas cada uma (Figura 10). Tanto as medidas de incremento de biomassa quanto às medidas de LAI usando o LAI-2000 foram realizadas durante todos os meses do ano de 2004. Para este ano, foram feitas, também, estimativas médias diárias de LUE.

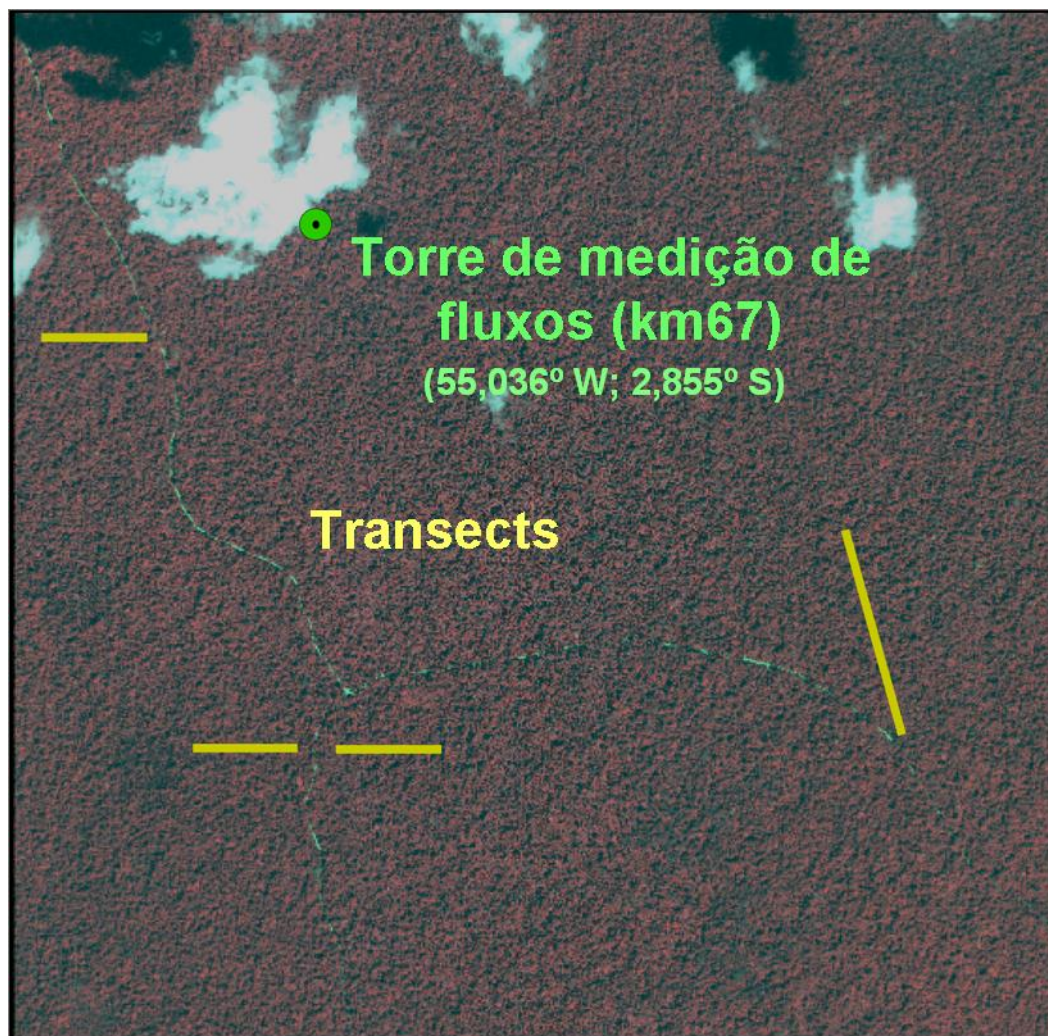


Figura 10. Imagem do Ikonos para o sítio KM67 com as localizações dos “transects” e da torre de medição de fluxos.

Para a calibração do modelo SITE, o conjunto de dados utilizados foi: Sin, Lin, PARi, saldo de radiação (Rn), Ta, ua, velocidade de fricção do vento (u^*), P, qa, H, LE e NEE, coletados no período de 19/06/2002 à 29/08/2003. Todas essas medidas foram tomadas acima do dossel a 65 m de altura. Os dados de Ta, qa, ua, Sin, Lin e P foram usados para forçar o modelo e os demais para avaliar o desempenho. Os dados de Lin foram estimados por meio da expressão descrita na Equação 4, em que se supõe que a temperatura efetiva da emissão do dossel é igual à temperatura absoluta do ar.

$$Lin = Rn - Sin + \lambda \sigma Ta^4 \quad (4)$$

Onde $\lambda = 0,9975$ é a emissividade do dossel e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a Constante de Stefan-Boltzmann.

Como o modelo SITE já apresentava, antes de ser calibrado, uma boa estimativa para Rn e PARi, com ótimos resultados para os coeficientes de calibração em relação aos valores observados, não foi necessário uma alteração nos parâmetros de calibração desses fluxos. Com esses parâmetros, H apresentou um bom resultado com uma pequena subestimativa do valor acumulado no início e no final do período de simulação, mas o modelo superestimou LE acumulado para todo o período simulado, e superestimou NEE acumulado no mesmo período, pois apresentava uma baixa estimativa para a respiração noturna.

O modelo SITE foi então calibrado comparando os dados de H, LE e NEE observados com os valores simulados, a partir da obtenção dos valores dos parâmetros biofísicos que aperfeiçoam as estatísticas dos coeficientes de correlação (ρ) e de inclinação da reta de regressão (α) entre os dados simulados e observados, e minimizam a raiz do erro quadrado médio (RMSE), priorizando o melhor ajuste para NEE.

Os dados usados na calibração dos resultados do modelo tiveram todas as suas falhas preenchidas por interpolação, de acordo com as relações propostas por

SENNA (2004), e foram filtrados para eliminar valores espúrios, utilizando os seguintes critérios: de $PAR_i < 0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $R_n < -100 \text{ W m}^{-2}$ ou $R_n > 1200 \text{ W m}^{-2}$; do limiar da velocidade de atrito; e do fechamento do balanço de energia. O critério do limiar da velocidade de atrito se baseia no questionamento de alguns autores acerca da 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 (CURTIS et al. 2002; SALESKA et al. 2003; e KRUIJT et al. 2004). Nesta calibração foi usado $u^*_0 = 0,2 \text{ m s}^{-1}$, ou seja, os períodos que apresentaram valores inferiores a u^*_0 foram descartados da análise. Já o critério do fechamento do balanço de energia se baseia no fato de que as medidas dos principais componentes do balanço de energia, feitas por instrumentos independentes, freqüentemente não são consistentes com o princípio de conservação de energia ($R_n = H + LE + G + S$, em que G é o fluxo de calor no solo e S é a taxa de variação da energia armazenada no dossel). Segundo KUSTAS et al. (1999) e TWINE et al. (2000), 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, e o viés no fechamento do balanço de energia é definido por $\delta = 1 - (H+LE)/(R_n-G-S)$. Com isso, o critério do fechamento do balanço de energia limita a fração dos dados diários de $H+LE$ que está dentro do intervalo $[(1-\delta)(R_n-G-S), (1+\delta)(R_n-G-S)]$. Como os dados diários de G e S normalmente são duas ordens de grandeza inferiores a R_n , estes foram supostos como desprezíveis, o que é razoável para médias diárias, e foram aproveitados apenas os valores de H e LE 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, de acordo com $(1-\delta) \leq \left| \frac{H+LE}{R_n} \right| \leq (1+\delta)$.

Os parâmetros do modelo calibrados foram as taxas de respiração das raízes grossas, das raízes finas, dos galhos e troncos; a capacidade máxima da enzima Rubisco

a 15°C ($V_{\text{máx}}$); o coeficiente angular relacionado à condutância estomática (m); a capacidade térmica dos galhos (C_s) e a capacidade térmica das folhas (C_u). Primeiramente procurou-se encontrar um melhor ajuste para as taxas de respiração das raízes grossas, das raízes finas, dos galhos e troncos multiplicando estes parâmetros por um fator de 2, 3 ou 4, e ajustar H e LE a partir de $C_s = 2,109 \times 10^5 \text{ J m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $C_u = 2,109 \times 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ encontrados por IMBUZEIRO (2005), com os expoentes variando entre 3 e 5. Foram feitas simulações com $V_{\text{máx}}$ variando de 10 em 10 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, variando de 70 a 120 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; e com m variando de 1 em 1, variando de 7 a 10.

Na calibração do modelo SITE foi considerado, também, o ajuste do erro relativo para a NPP entre o valor simulado e o valor observado para 2004, e o ajuste do erro relativo e de RMSE para o LAI entre os valores simulados e os valores observados para 2004.

Foram estimados dados de FAPAR (Equação 5) a partir dos dados de PAR_i , radiação fotossinteticamente ativa refletida (PAR_r) e radiação fotossinteticamente ativa transmitida (PAR_t) medidos para o período de 2001 a 2002, conforme apresentado por SENNA et al. (2005).

$$FAPAR = 1 - r - t \quad (5)$$

Onde $r = PAR_r/PAR_i$ é a refletividade da radiação fotossinteticamente ativa; e $t = PAR_t/PAR_i$ é a transmissividade da radiação fotossinteticamente ativa.

Foi estimada também a NPP para o sítio KM67 a partir do incremento de biomassa da madeira (Equação 6), medido para o ano de 2001 conforme apresentado por VIEIRA et al. (2004), e das razões entre NPP de folhas (NPP_f) e NPP da madeira (NPP_w) – NPP_f/NPP_w e $BNPP/ANPP$ obtidas a partir das estimativas dos incrementos de biomassa para o ano de 2004.

2.2.1.2. Sítios ZF-2 e UFAC

O sítio ZF-2 está localizado na Estação Experimental de Silvicultura Tropical operada pelo Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA). Essa área compreende cerca de 2.000 ha e está situada entre os marcos 21 km e 24 km da estrada secundária ZF-2, a aproximadamente 90 km ao norte de Manaus no estado do Amazonas, Brasil. O sítio UFAC está localizado na Fazenda Experimental Catuaba da Universidade Federal do Acre, com uma área de aproximadamente 860 ha e está situada na região leste do Estado do Acre, Brasil, às margens da BR 364, distando 23 km da cidade de Rio Branco, capital do estado.

A partir do estudo desenvolvido por VIEIRA et al. (2004) na região Amazônica, ao longo de um gradiente climático, foram estimados para os anos de 2001 e 2002 a NPP para os sítios ZF-2 e UFAC utilizando o incremento de biomassa da madeira estimada a partir da equação alométrica (Equação 6) proposta por CHAMBERS et al. (2001) e os resultados de alocação média de biomassa obtidos pelo projeto LBA para o sítio KM67.

$$\ln(\text{biomassa}) = a + b_1 \ln(\text{DAP}) + b_2 [\ln(\text{DAP})]^2 + b_3 [\ln(\text{DAP})]^3 \quad (6)$$

Onde: $a = -0,370$; $b_1 = 0,333$; $b_2 = 0,933$; $b_3 = -0,122$.

2.2.1.3. Sítio SINOP

O sítio experimental SINOP, parte do projeto LBA, está localizado a aproximadamente 50 km NE da cidade de Sinop, norte de Mato Grosso, Brasil, pertencente à bacia do rio Teles Pires, numa região de transição entre floresta e cerrado. As florestas de transição ocupam uma faixa climática larga que separa a floresta de terra firme úmida da bacia central da Amazônia da savana tropical mais seca (cerrado) com uma sazonalidade característica (SPOLADOR et al., 2006).

Neste sítio, estavam disponíveis para a medição da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) dois sensores (LI-190SB, LI-COR), um com a face voltada para cima (PARi) e outro com a face voltada para baixo (PARr), ambos instalados a 42 metros de altura, e um sensor com a face voltada para cima aproximadamente à aproximadamente 1 metro do solo (PARt).

Com os dados dos valores médios horários de PARi, PARr e PARt fornecidos pelo projeto LBA (SPOLADOR et al., 2006) para o período de 2001 a 2003 foi possível obter os valores médios mensais de FAPAR a partir dos valores médios diários de FAPAR determinados pelos valores médios horários de PARi, PARr e PARt, de acordo com a Equação 5.

O LAI foi estimado a partir da transmitância de luz no dossel. O método foi baseado na relação entre a área foliar e a transmitância da radiação, descrita a partir da inversão da Lei de Lambert-Beer:

$$LAI = -\ln(PARt/PARi)/k \quad (7)$$

O k (coeficiente de extinção da luz) teve seus valores médios horários mensais estimados a partir dos valores horários diários obtidos pela variação do ângulo solar zenital (z):

$$k = k_m / \cos(z) \quad (8)$$

onde $k_m = 0,50$ para coberturas de árvores com uma distribuição esférica dos ângulos de inclinação das folhas. Os valores de LAI médio mensal foram estimados a partir dos valores médios horários mensais de PARi, PARt e k, para os períodos de 8 às 16 horas.

2.2.1.4. Sítio BA712

Para o sítio de Mata Atlântica (Sítio BA712) foram considerados os dados coletados em uma área de preservação permanente (1.136 ha), área 712 pertencente à fazenda da Aracruz Celulose SA, situada no município de Teixeira de Freitas, sul do estado da Bahia, Brasil.

O conjunto de dados meteorológicos coletados foi: Sin, Rn, Ta, ua, P, umidade relativa do ar (URa) obtidos para o período de 01/04/2005 à 28/02/2007 (Figura 11). Esses dados tiveram todas as suas falhas preenchidas por interpolação, de acordo com as relações propostas por SENNA (2004). Todas essas medidas foram tomadas acima do dossel a 42 m de altura.

Os dados de Sin, Lin, Ta, qa, ua e P foram usados em uma simulação para forçar o modelo SITE, com o objetivo de validar os valores de NPP para o sítio em questão. Os dados de Lin foram estimados por meio da expressão apresentada na Equação 4. Os dados de qa foram estimados por meio da expressão apresentada na Equação 8.

$$qa = qs \cdot URa/100 \quad (8)$$

Onde qs é a umidade específica de saturação obtida pela expressão apresentada na Equação 9.

$$qs = 0,622 \cdot es/(Pa - 0,378 \cdot es) \quad (9)$$

Onde Pa é a pressão atmosférica média local e es é a pressão de saturação do vapor d'água dada pela expressão apresentada na Equação 10.

$$es = 100 \cdot 10^{(-2937,4 / Ta - 4,9283 \log_{10}(Ta) + 23,5470)} \quad (10)$$

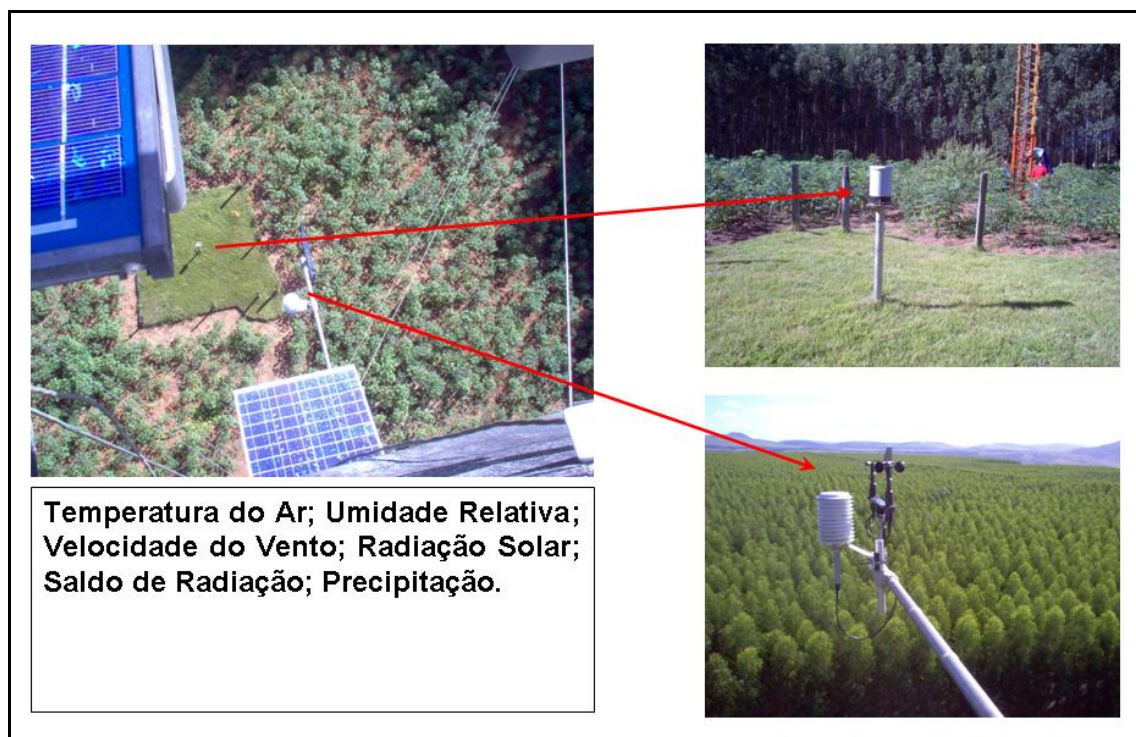


Figura 11. Visualização dos instrumentos de medidas meteorológicas do sítio BA712.

A simulação foi feita para o conjunto de dados utilizando os dados do período de 01/04/2005 a 31/12/2006, sendo que o período de 01/04/2005 a 31/12/2005 foi utilizado para estabilização do modelo. Para análise dos resultados foram considerados apenas os dados referentes ao período de 01/01/2006 a 31/12/2006.

No período de 21 a 29 de julho de 2005 foram instaladas duas parcelas permanentes de 400 x 25 m ($10.000 \text{ m}^2 = 1 \text{ ha}$) no sítio BA712, sendo a parcela 01 orientada no sentido leste-oeste ao longo do seu comprimento e a parcela 02 orientada no sentido norte-sul ao longo de seu comprimento, dentro de uma área de 2 x 2 km, Figura 12.

As parcelas foram demarcadas com o auxílio de bússola e um GPS. Dentro destas parcelas foram estabelecidas 16 sub-parcelas de 25 x 25 m, onde as árvores que apresentavam diâmetros do tronco, medidos à altura do peito ($\pm 1,30 \text{ m}$ do solo), maiores ou iguais a 10 cm foram mapeadas, numeradas, medidas e tiveram bandas dendrométricas instaladas para acompanhamento semestral do incremento diamétrico dos troncos iniciando em 15 de dezembro de 2005 (Figura 13).

Com os dados de diâmetro do tronco à altura do peito (DAP), uma equação alométrica proposta por BROWN e IVERSON (1992) que relaciona a biomassa da madeira com DAP (Equação 11) e resultados de alocações médias de biomassa obtidas pelo projeto LBA no Sítio KM67 pode-se determinar a biomassa e o incremento de biomassa total para as árvores das duas parcelas juntamente com o carbono alocado por metro quadrado, sendo o carbono estimado em 50% da biomassa total (BROWN et al., 1995).

A Equação 11 foi usada por TIEPOLO et al. (2002) para um sítio de Mata Atlântica por ser uma equação alométrica desenvolvida para condições climáticas próximas as encontradas nestes sítios (quantidade e distribuição de precipitação; e incidência de radiação solar).



Figura 12. Imagem da localização da área experimental, do sítio e das parcelas no sítio BA712. Fonte: Google Earth.

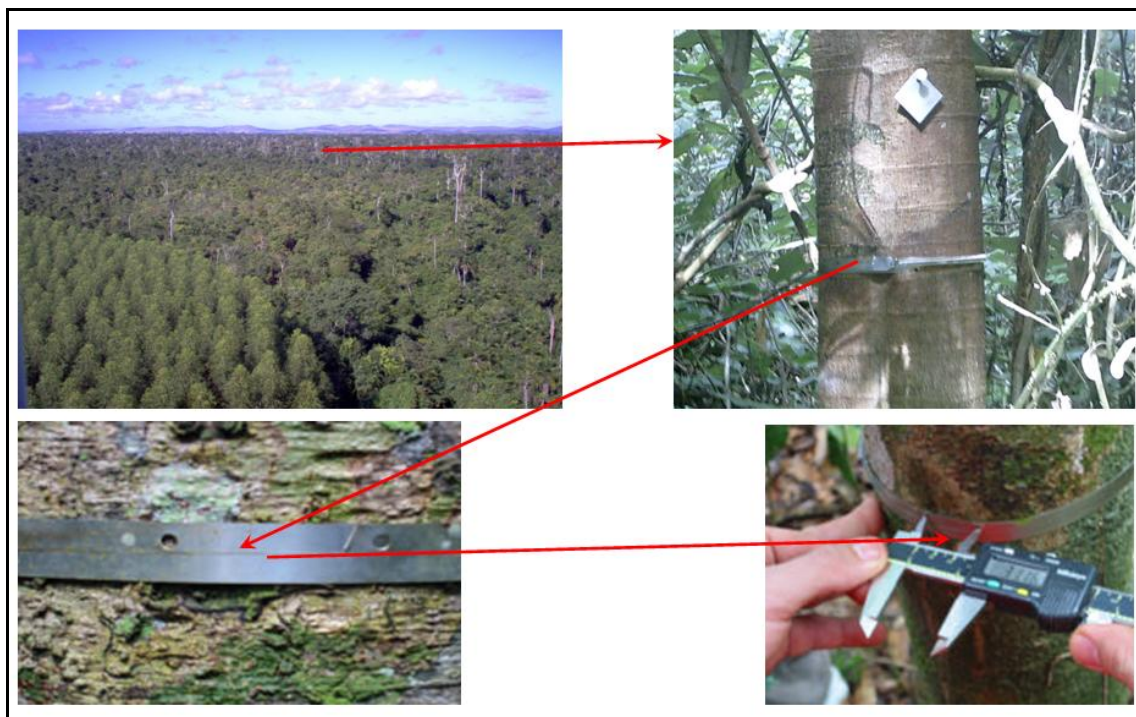


Figura 13. Foto da instalação da banda dendrométrica e da medida do seu incremento diamétrico para o sítio BA712.

$$\text{biomassa} = 21,297 - 6,953(\text{DAP}) + 0,74 (\text{DAP})^2 \quad (11)$$

2.2.2. Dados de NPP do MODIS (MOD17A3)

Os dados de NPP do produto MODIS (MOD17A3) foram adquiridos para os sítios que tiveram os dados de estimativas de NPP obtidos a partir de medidas de campo (KM67, ZF-2, UFAC e BA712).

Para os sítios pertencentes ao projeto LBA (KM67, ZF-2 e UFAC), com áreas de 25 km², foram obtidos os valores de NPP, para os mesmos anos que foram feitas as medidas de campo, a partir da média aritmética dos valores de NPP obtidos para uma grade de 25 pixels de 1 km². Para o sítio BA712, com área de 4 km², foi utilizada uma grade de 4 pixels de 1 km² (Figura 14).

Os dados de NPP do produto MOD17A3, por pertencerem ao único algoritmo disponível, foram usados para comparação com os dados obtidos pelo algoritmo RATE e validação com os dados medidos em campo.

Finalmente, foi realizado um estudo de caso a partir de uma simulação com o algoritmo RATE no período de 26 de fevereiro de 2000 até 31 de dezembro de 2006, com o intuito de se avaliar uma série temporal de NPP gerada pelo algoritmo para a floresta tropical da América do Sul e para os sítios experimentais onde foram feitas as medidas de NPP.

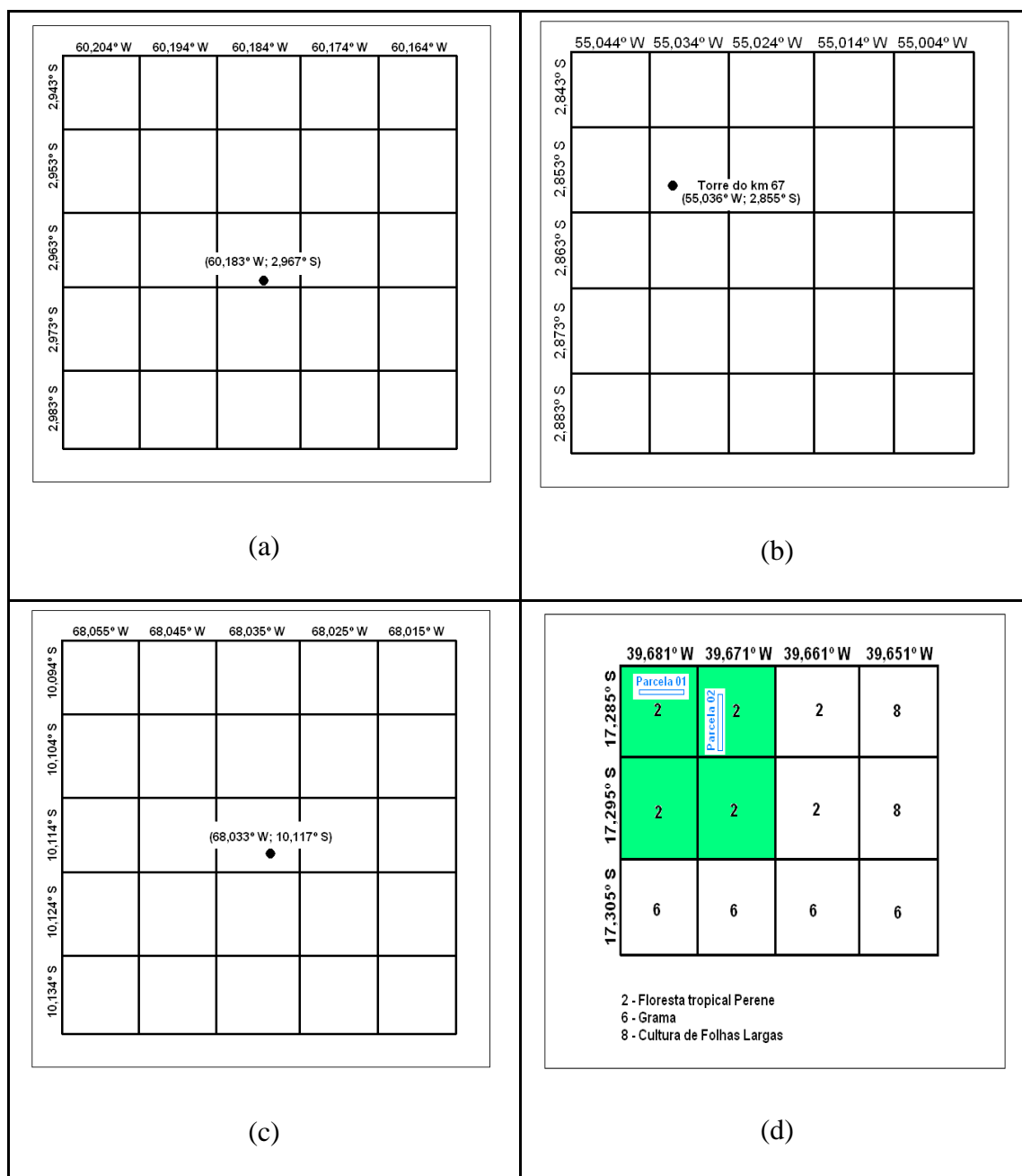


Figura 14. Grade do MODIS para os sítios: (a) ZF-2; (b) KM67; (c) UFAC; (d) BA712.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produto de Assimilação da Cobertura do Solo

O produto de assimilação para a cobertura do solo com uma resolução espacial de 0,40° fornece os dados com os pixels de Floresta Tropical obtidos para a América do Sul (Figura 15) e a frequência de ocorrência do bioma em cada pixel de 0,40° para o ecossistema de Floresta Tropical em questão (Figura 16).

O produto com os pixels de floresta tropical na grade de 0,40° com uma frequência de ocorrência do bioma em cada pixel maior ou igual a 60%, considerado pelo algoritmo RATE, é o primeiro produto de inicialização do algoritmo RATE e o principal responsável pela localização do campo de pixels do produto de NPP gerado pelo algoritmo.

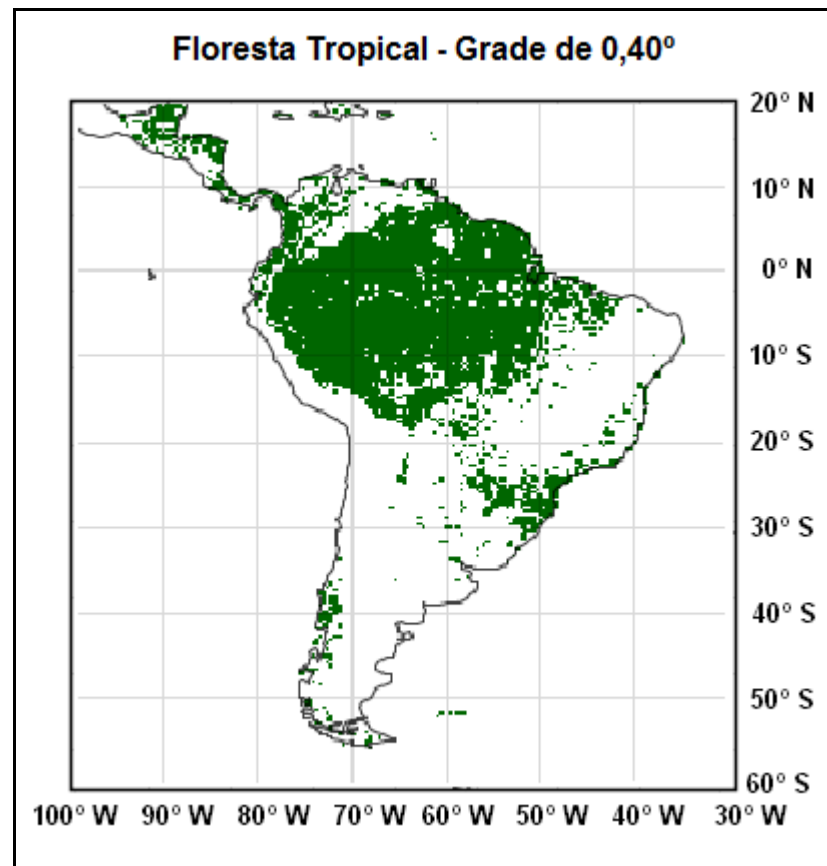


Figura 15. Mapa da cobertura do solo assimilada para o bioma de floresta tropical da América do Sul em uma grade de 0,40°.

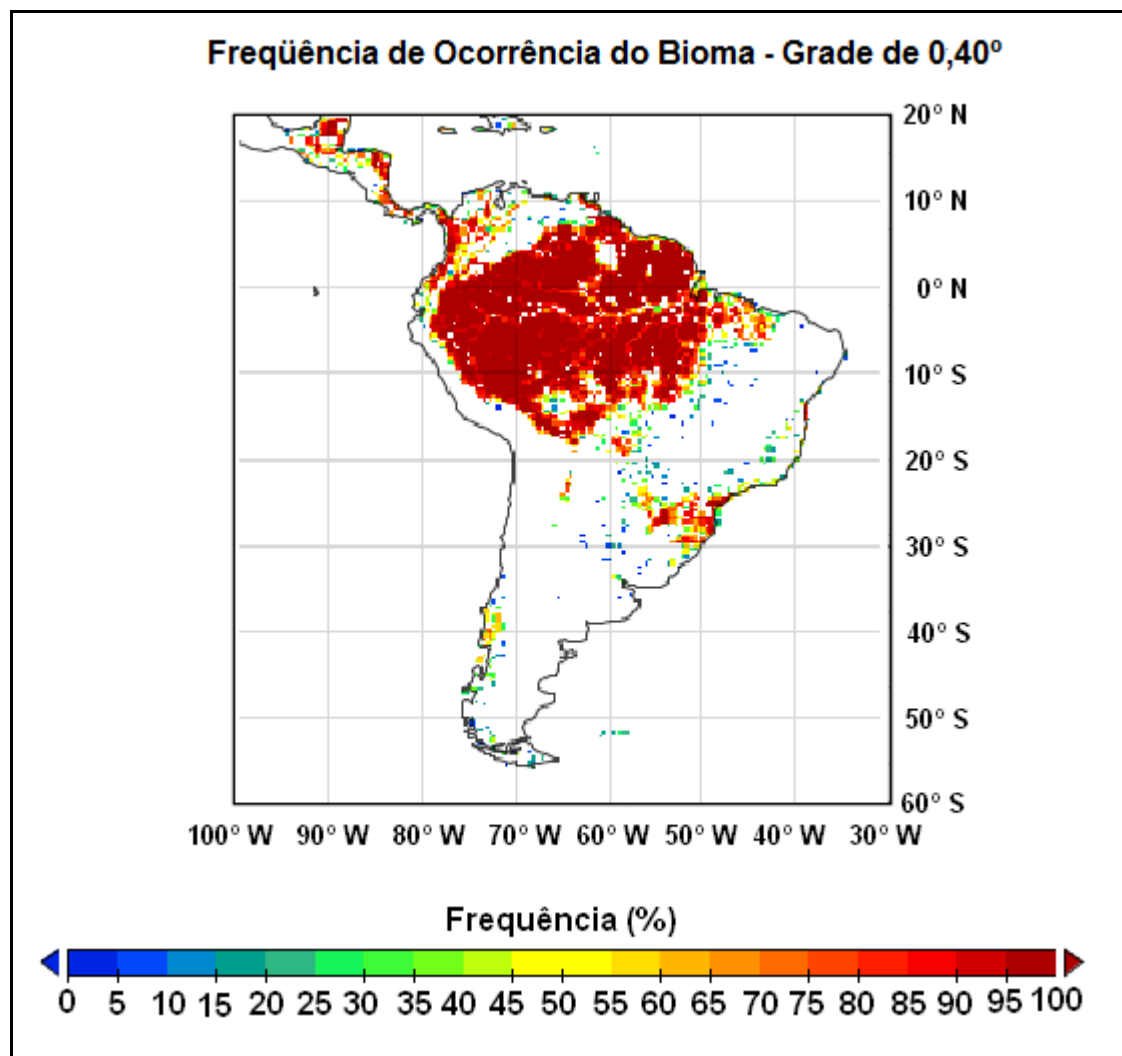


Figura 16. Mapa da frequência de ocorrência do bioma de floresta tropical em cada pixel de 0,40° para a América do Sul.

3.2. Produto de assimilação de LAI e FAPAR

Com relação ao produto de assimilação de LAI e FAPAR, a partir da série temporal dos dados de LAI e FAPAR obtidos com o produto MOD15A2 para os sítios SINOP e KM67 (Figuras de 17 a 23) e dos valores médios mensais de LAI e FAPAR que foram medidos em campo para estes sítios (Figuras de 24 a 30), obteve-se os valores médios anuais dos maiores valores de LAI e FAPAR do MOD15A2 para a grade 0,40° e os valores médios anuais de LAI e FAPAR que foram medidos em campo. Com isso, obteve-se, então, o fator de calibração para o produto de assimilação de LAI e FAPAR (Tabelas 3 e 4).

A série temporal de LAI e FAPAR do MOD15A2 (Figuras de 17 a 23) apresenta, para os sítios em questão, grandes amplitudes de oscilação nos seus valores durante uma boa parte do ano, evidenciando assim uma perda na qualidade dos dados. Essa perda na qualidade dos dados está associada à grande dependência desse produto a medidas com boa qualidade dos campos de refletância utilizados em sua obtenção, medidas que são extremamente sensíveis a presença de cobertura de nuvens, que é uma ocorrência muito comum para as áreas de Floresta Amazônica. Se for considerada a associação entre a presença de cobertura de nuvens e os períodos com altas taxas de precipitação, pode-se verificar a partir dos dados de precipitação para o sítio KM67 (Figura 53) que para os períodos com alta incidência de precipitação os valores de LAI e FAPAR apresentaram seus menores valores.

Os valores médios anuais dos valores de LAI e FAPAR máximos para cada pixel de 0,40° (Tabelas 3 e 4) tendem a superestimar os valores de LAI e FAPAR em relação aos valores observados em campo. Com a média dos erros relativos obtidos para esses valores obteve-se o fator de calibração para o produto de assimilação de LAI e FAPAR. O fator de calibração, igual à diferença entre a unidade e o erro médio, é igual a 0,7711 para o LAI e 0,9318 para o FAPAR.

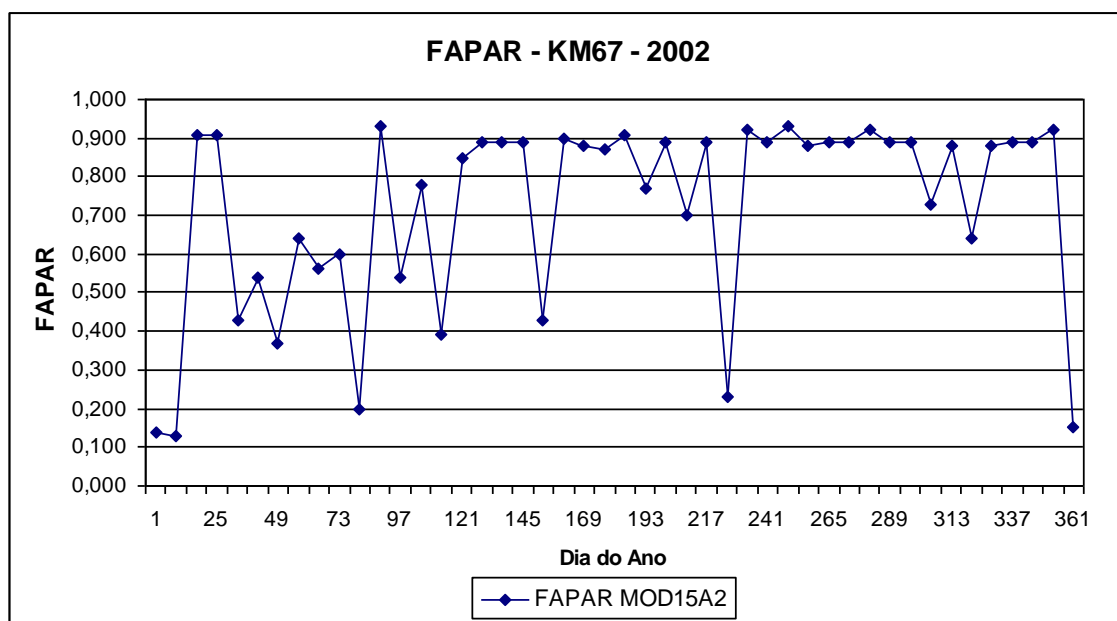


Figura 17. Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio KM67 em 2002.

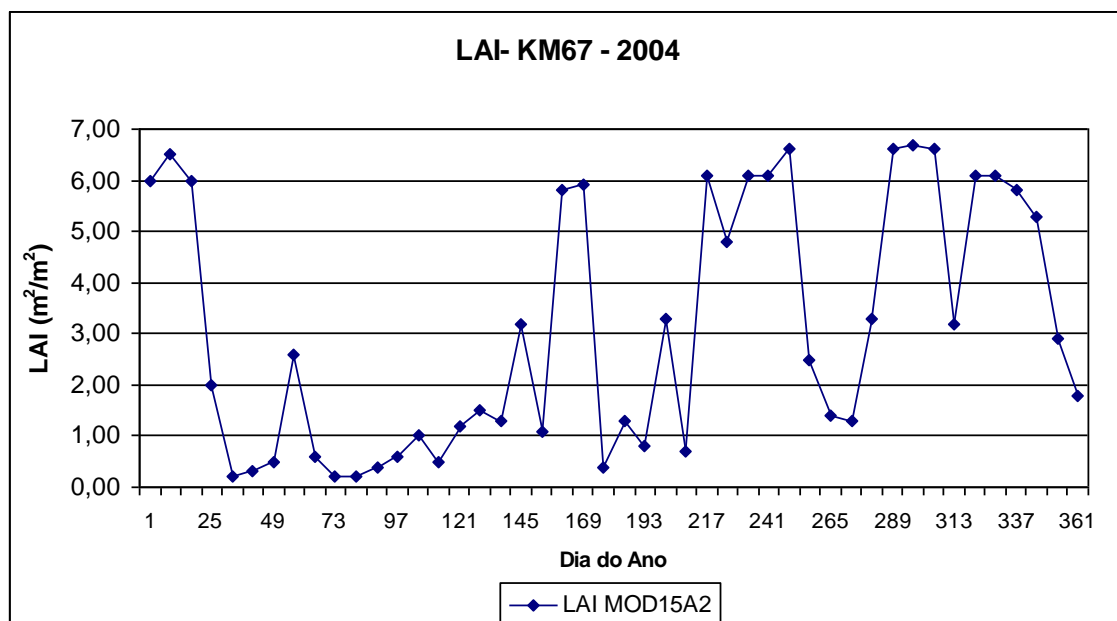


Figura 18. Série temporal de LAI obtida a partir do MOD15A2 para o sítio KM67 em 2004.

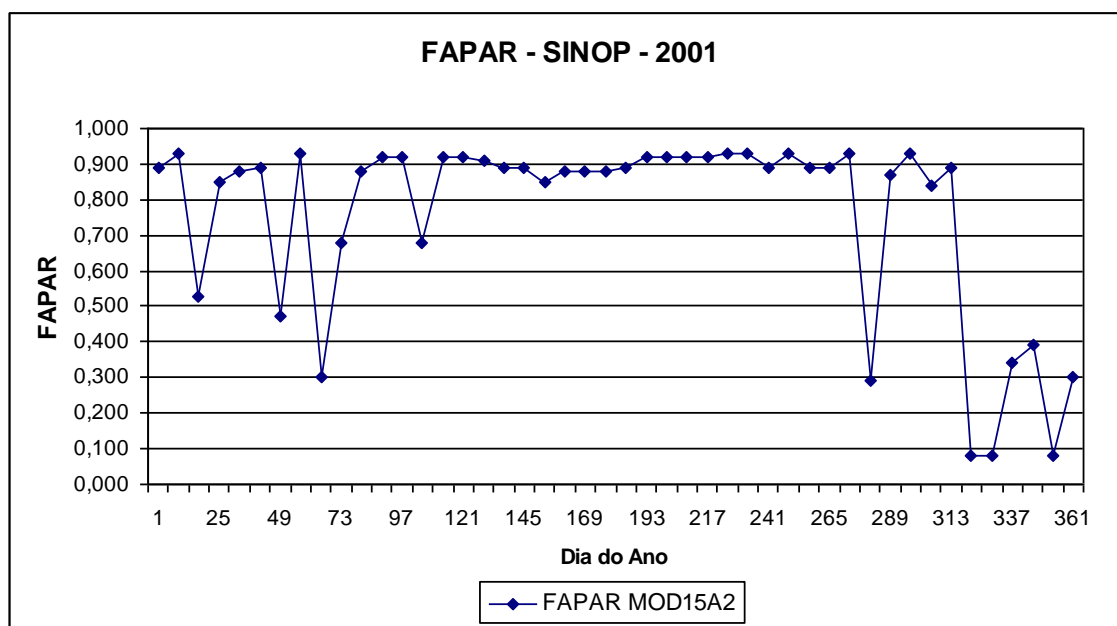


Figura 19. Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2001.

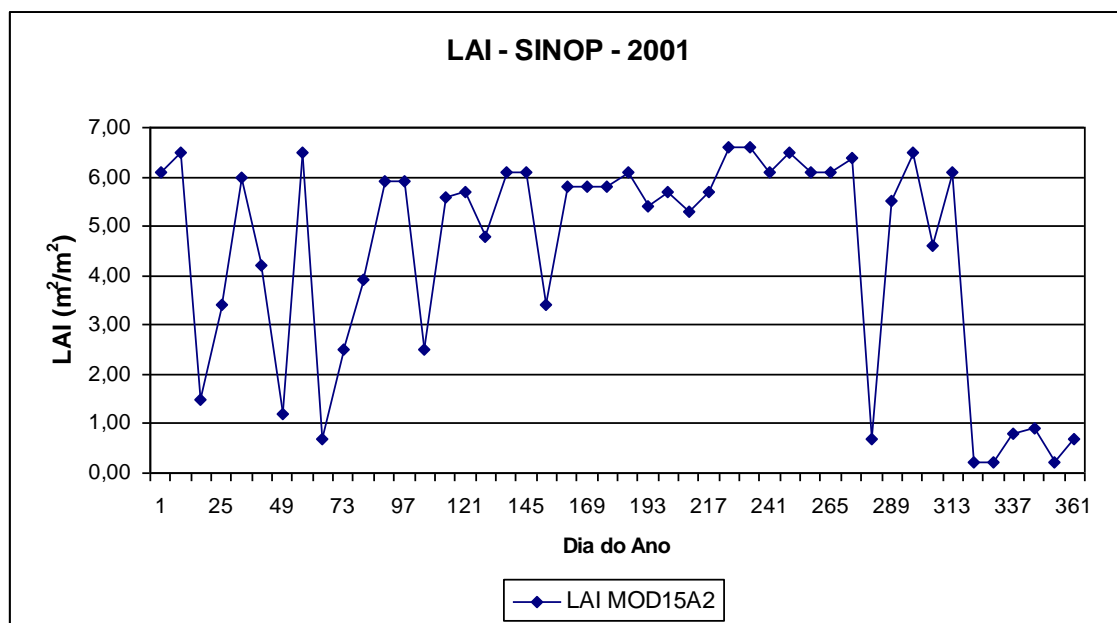


Figura 20. Série temporal de LAI obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2001.

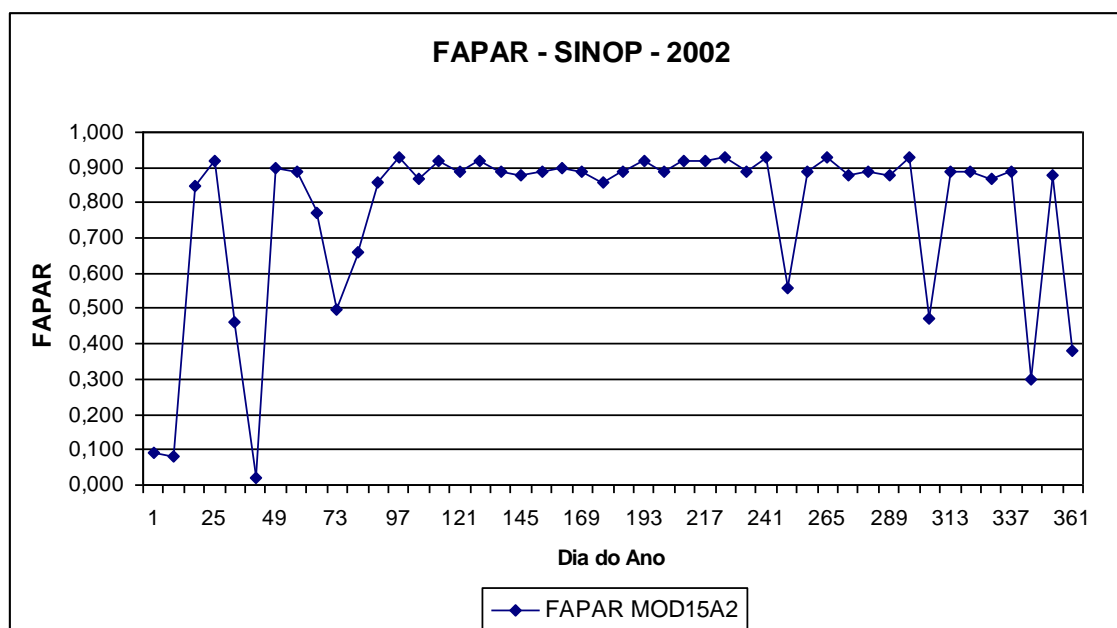


Figura 21. Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2002.

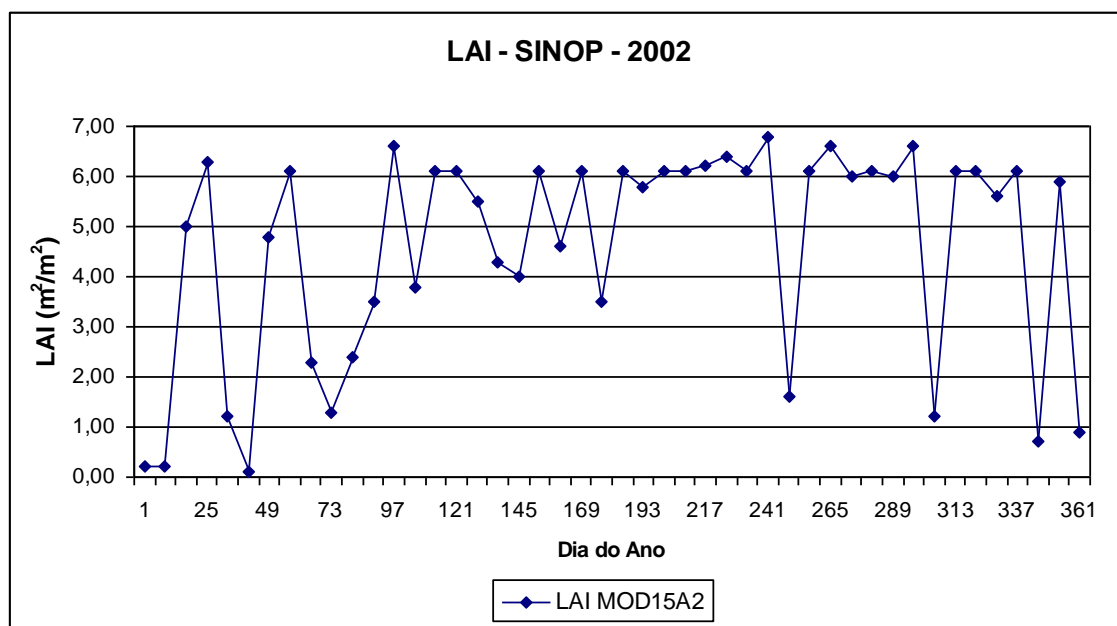


Figura 22. Série temporal de LAI obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2002.

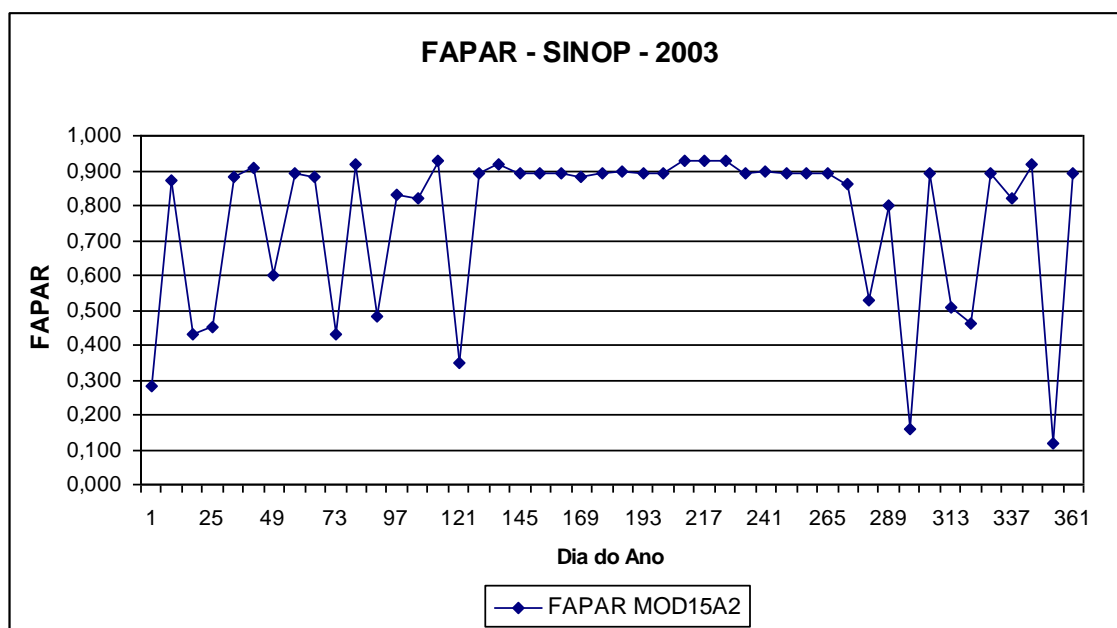


Figura 23. Série temporal de FAPAR obtida a partir do MOD15A2 para o sítio SINOP em 2003.

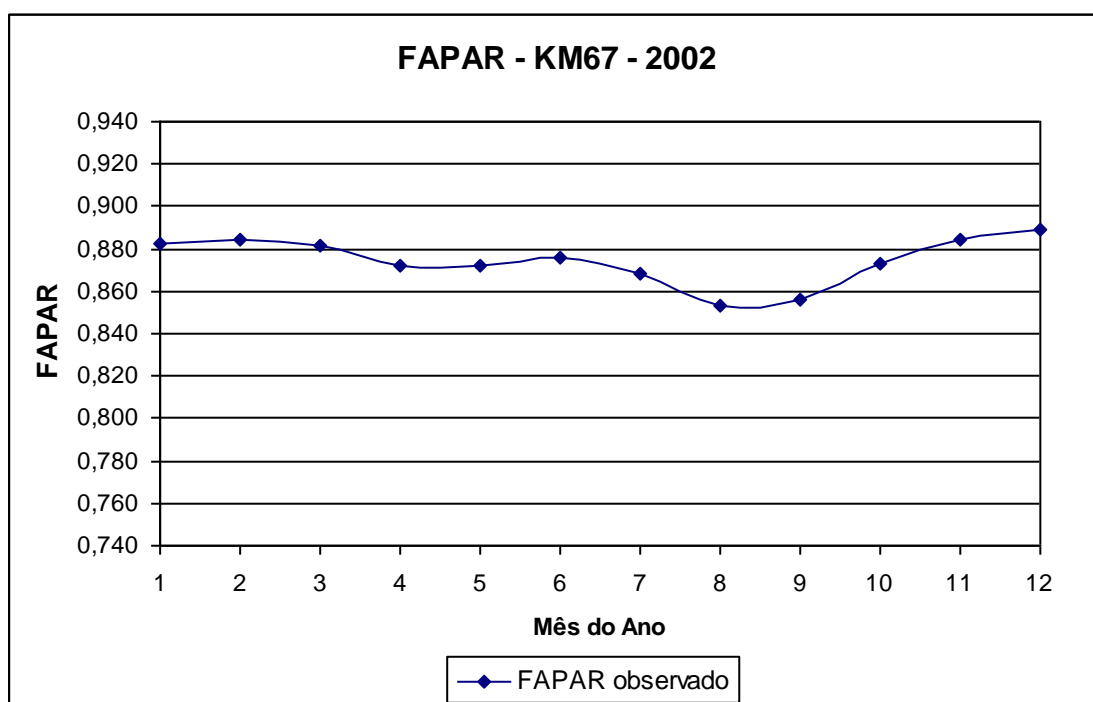


Figura 24. FAPAR médio mensal observado para o sítio KM67 em 2002.

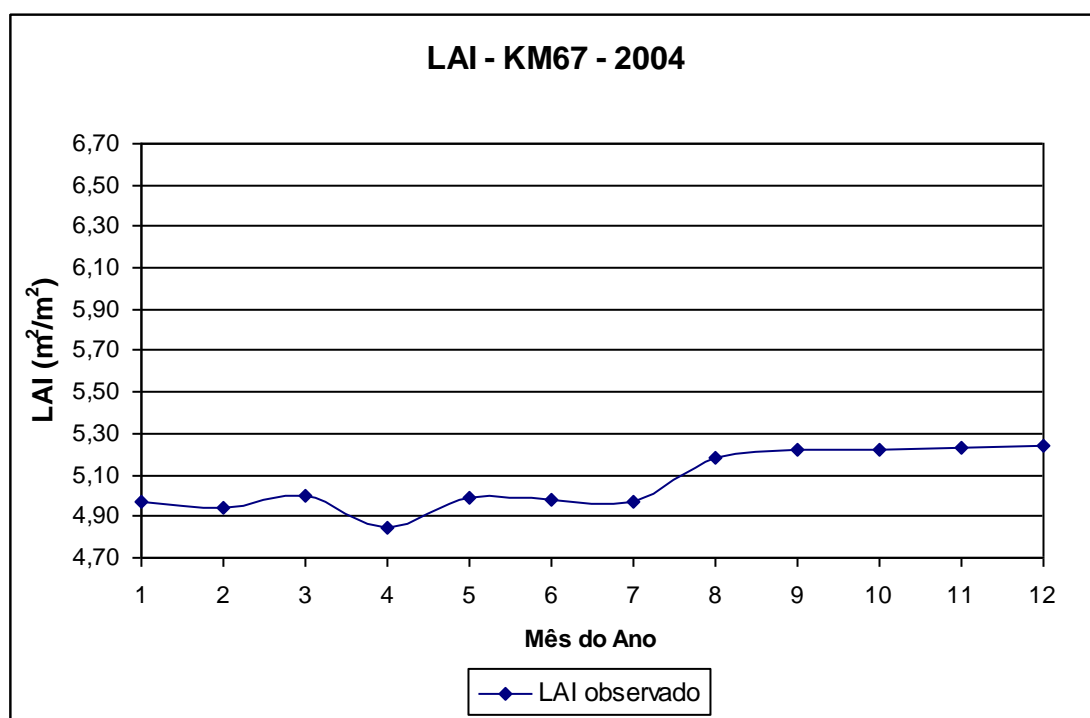


Figura 25. LAI médio mensal observado para o sítio KM67 em 2004.

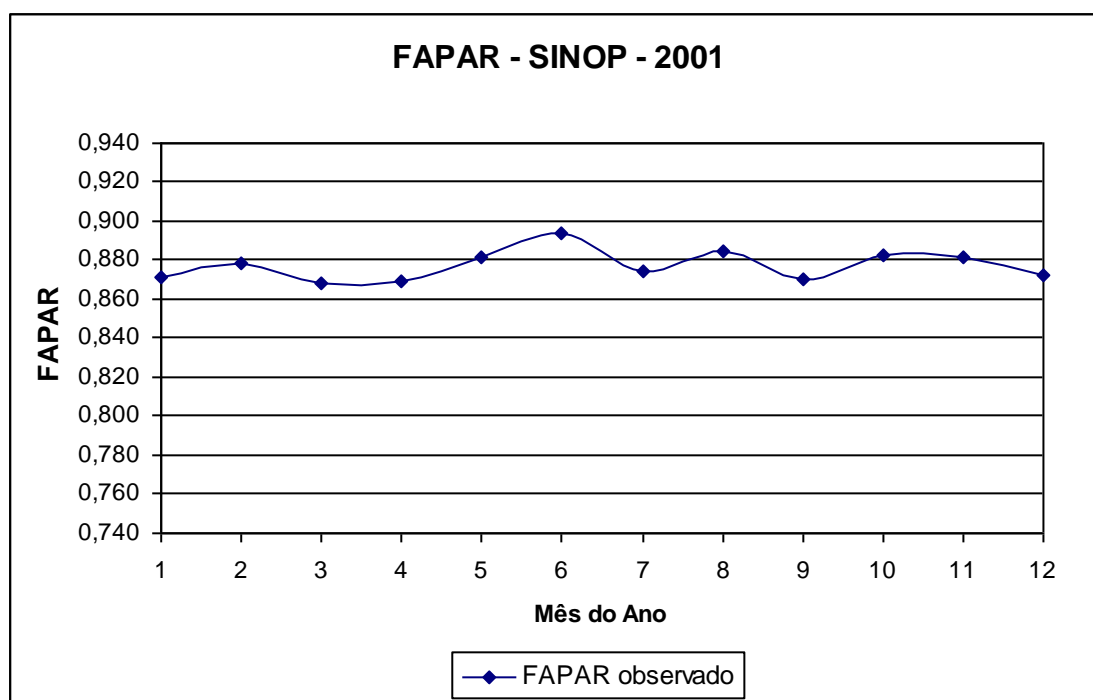


Figura 26. FAPAR médio mensal observado para o sítio SINOP em 2001.

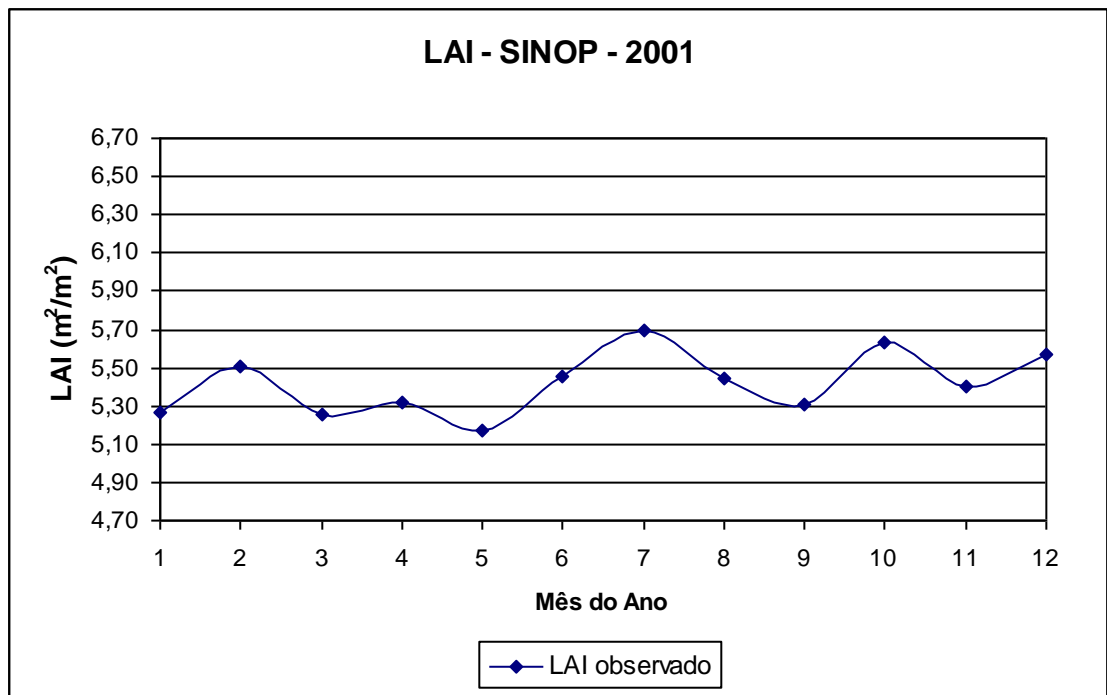


Figura 27. LAI médio mensal observado para o sítio SINOP em 2001.

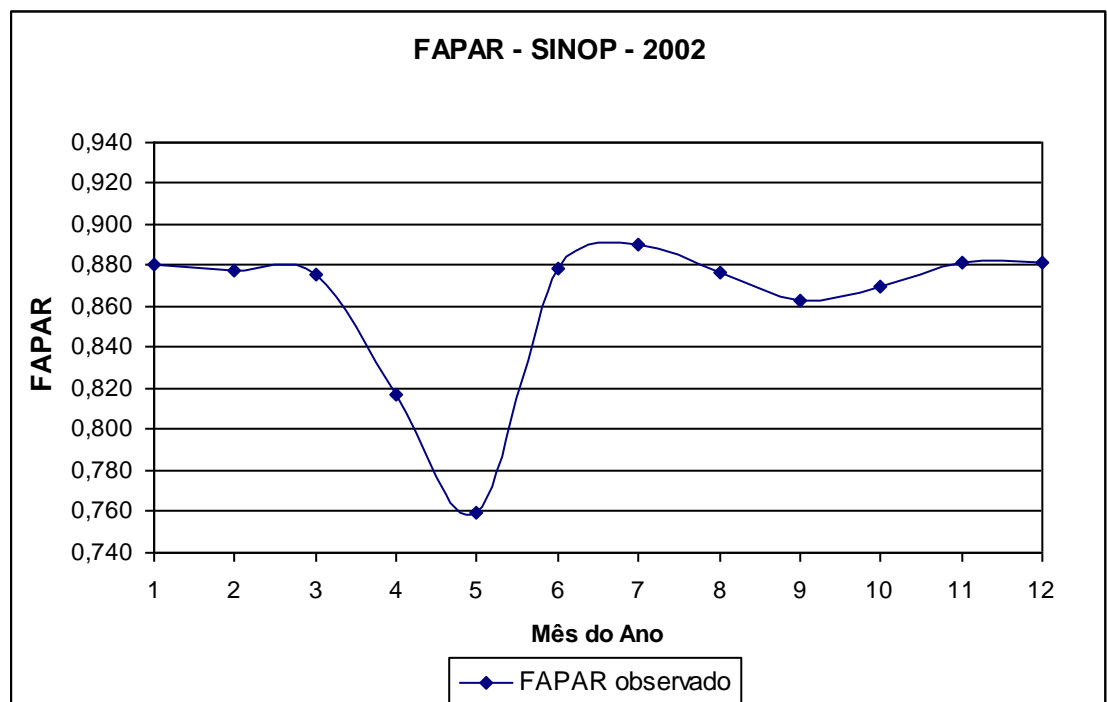


Figura 28. FAPAR médio mensal observado para o sítio SINOP em 2002.

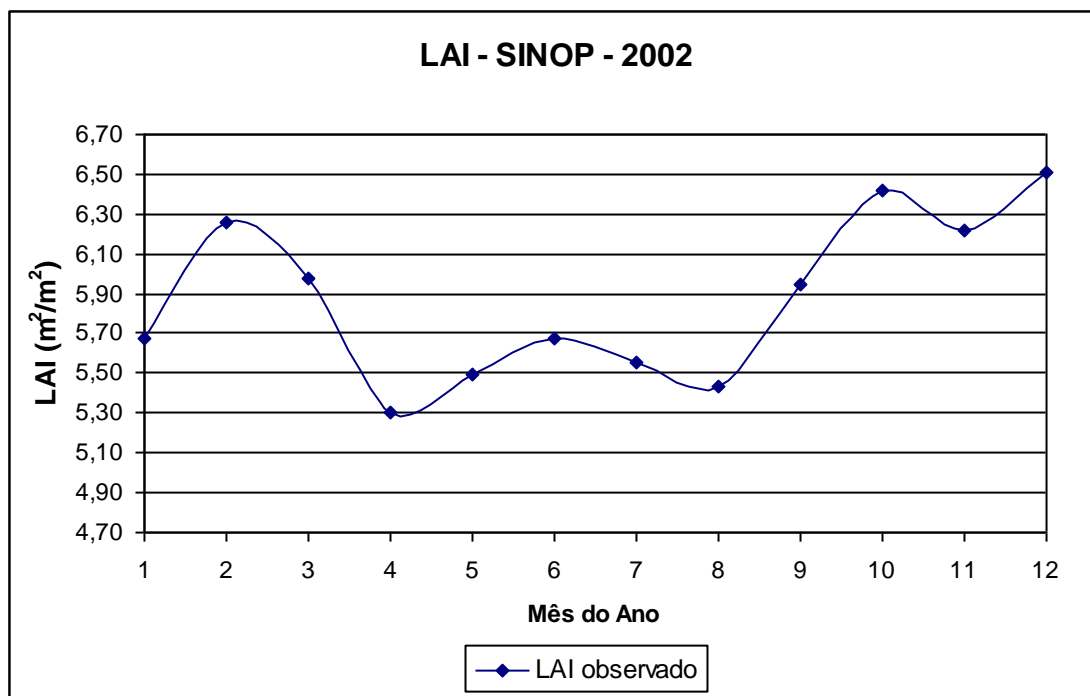


Figura 29. LAI médio mensal observado para o sítio SINOP em 2002.

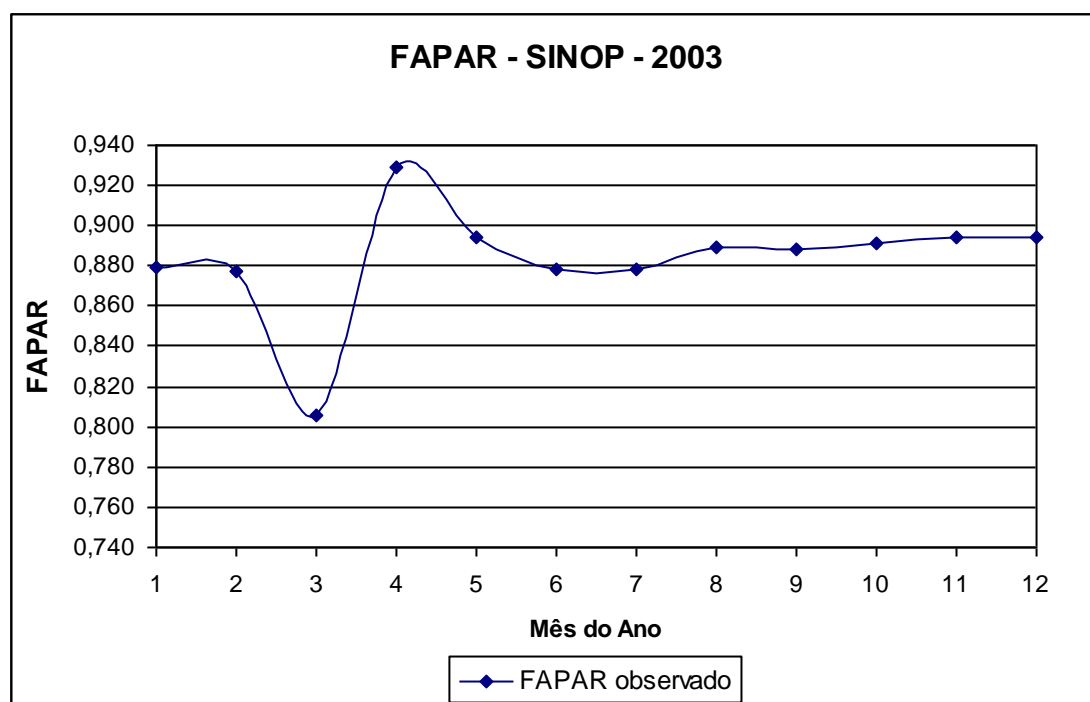


Figura 30. FAPAR médio mensal observado para o sítio SINOP em 2003.

Tabela 3. Valores médios anuais de LAI com desvio padrão, erro relativo e fator de calibração para o produto de LAI assimilado.

Sítio	Ano	LAI Observado (m ² /m ²)	LAI MODIS Máx. de 0,40° (m ² /m ²)	Erro	LAI MODIS Assimilado (m ² /m ²)	$ Erro $ (%)
KM67	2004	5,07±0,14	6,72±0,06	0,3254	5,18±0,05	2,17
SINOP	2001	5,42±0,16	6,64±0,32	0,2251	5,12±0,24	5,54
SINOP	2002	5,87±0,41	6,67±0,33	0,1363	5,14±0,26	12,44
Fator de Calibração				0,7711		

Tabela 4. Valores médios anuais de FAPAR com desvio padrão, erro relativo e fator de calibração para o produto de FAPAR assimilado.

Sítio	Ano	FAPAR Observado	FAPAR MODIS Máx. de 0,40°	Erro	FAPAR MODIS Assimilado	$ Erro $ (%)
KM67	2002	0,874±0,011	0,938±0,015	0,0732	0,874±0,014	0,00
SINOP	2001	0,877±0,008	0,936±0,020	0,0673	0,872±0,018	0,57
SINOP	2002	0,863±0,037	0,938±0,019	0,0869	0,874±0,018	1,27
SINOP	2003	0,883±0,028	0,923±0,042	0,0453	0,860±0,039	2,60
Fator de Calibração				0,9318		

O produto de assimilação de LAI e FAPAR usado na inicialização do algoritmo RATE foi gerado pela aplicação dos fatores de calibração aos valores da série temporal dos máximos valores de LAI e FAPAR para a grade 0,40°, o resultado deste produto pode ser verificado para os sítios SINOP e KM67 nas Figuras de 31 a 37. Os valores médios anuais de LAI e FAPAR para os sítios SINOP e KM67 obtidos pelo produto de assimilação apresentaram erros relativos, quando comparados com as médias anuais dos valores observados, variando de uma subestimação de 12,44% até uma superestimação de 2,17% para o LAI e uma subestimação de 2,60% até uma superestimação de 1,27% para o FAPAR.

3.3. Produto de Assimilação das Variáveis Meteorológicas

Com o produto de assimilação das variáveis meteorológicas obteve-se os campos para Sin, Lin, Ta, qa, ua, P e Pa em uma grade de 0,40° para a América do Sul, com intervalos de 6 em 6 horas, utilizados na inicialização do algoritmo RATE. Na Figura 38 são apresentados, como exemplo, resultados dos campos do produto de assimilação das variáveis meteorológicas de Sin, Lin, Ta, qa, ua e P para o dia 01 de janeiro de 2004 as 12 h UTC.

3.4. Dados de NPP

3.4.1. Medidas de Campo

Para o sítio KM67 foram obtidos os valores dos incrementos médios de biomassa para o ano de 2004 com suas respectivas alocações, apresentando uma relação entre o incremento médio de biomassa das folhas (NPPf) e o incremento médio de biomassa da madeira (NPPw) de $2,3693 \pm 1,5910$ e uma relação entre o incremento médio de biomassa das raízes (BNPP) e o incremento médio de biomassa acima do solo

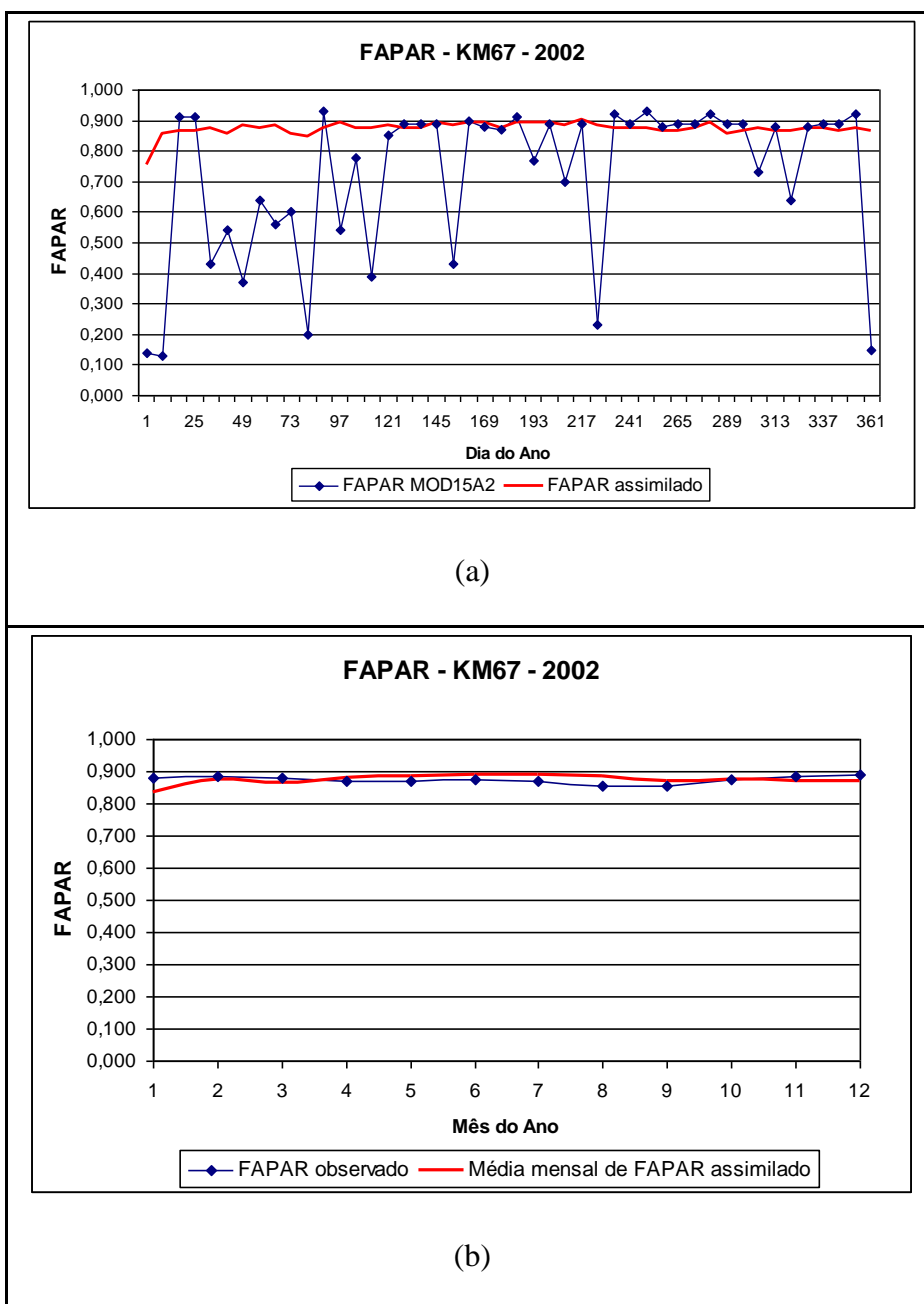


Figura 31. (a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio KM67 em 2002.

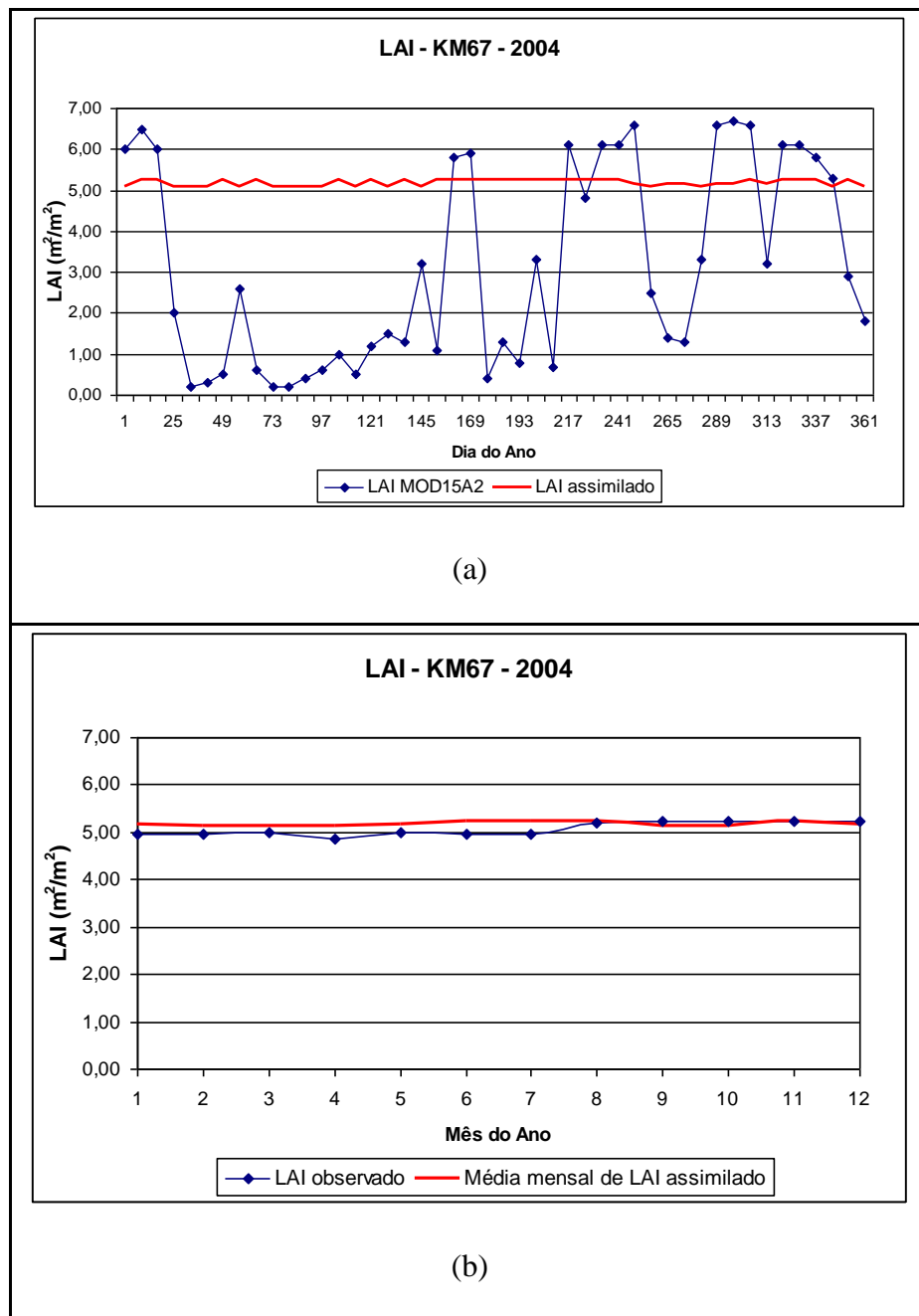


Figura 32. (a) Série temporal de LAI do MOD15A2 e de LAI assimilado; (b) valores médios mensais de LAI observado e de LAI assimilado; para o sítio KM67 em 2004.

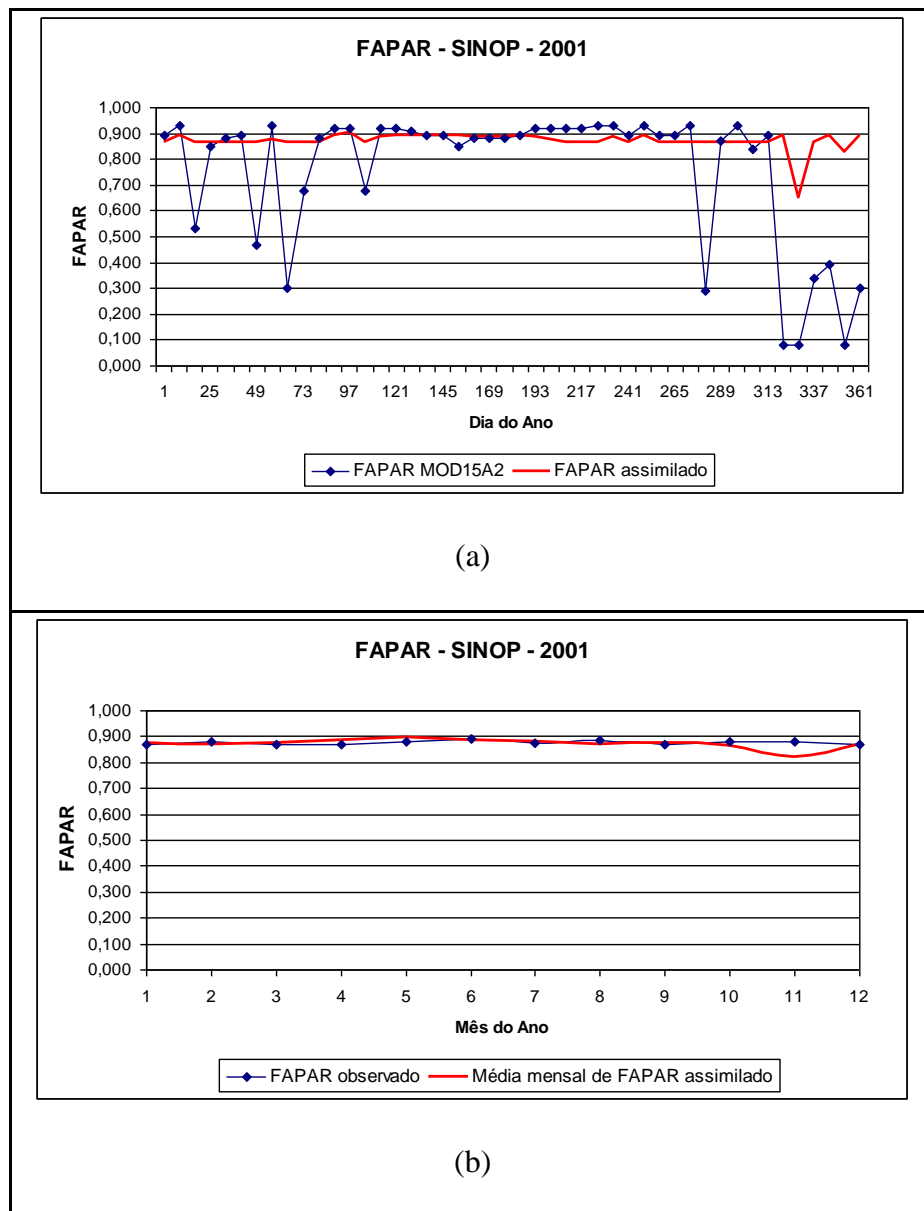


Figura 33. (a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio SINOP em 2001.

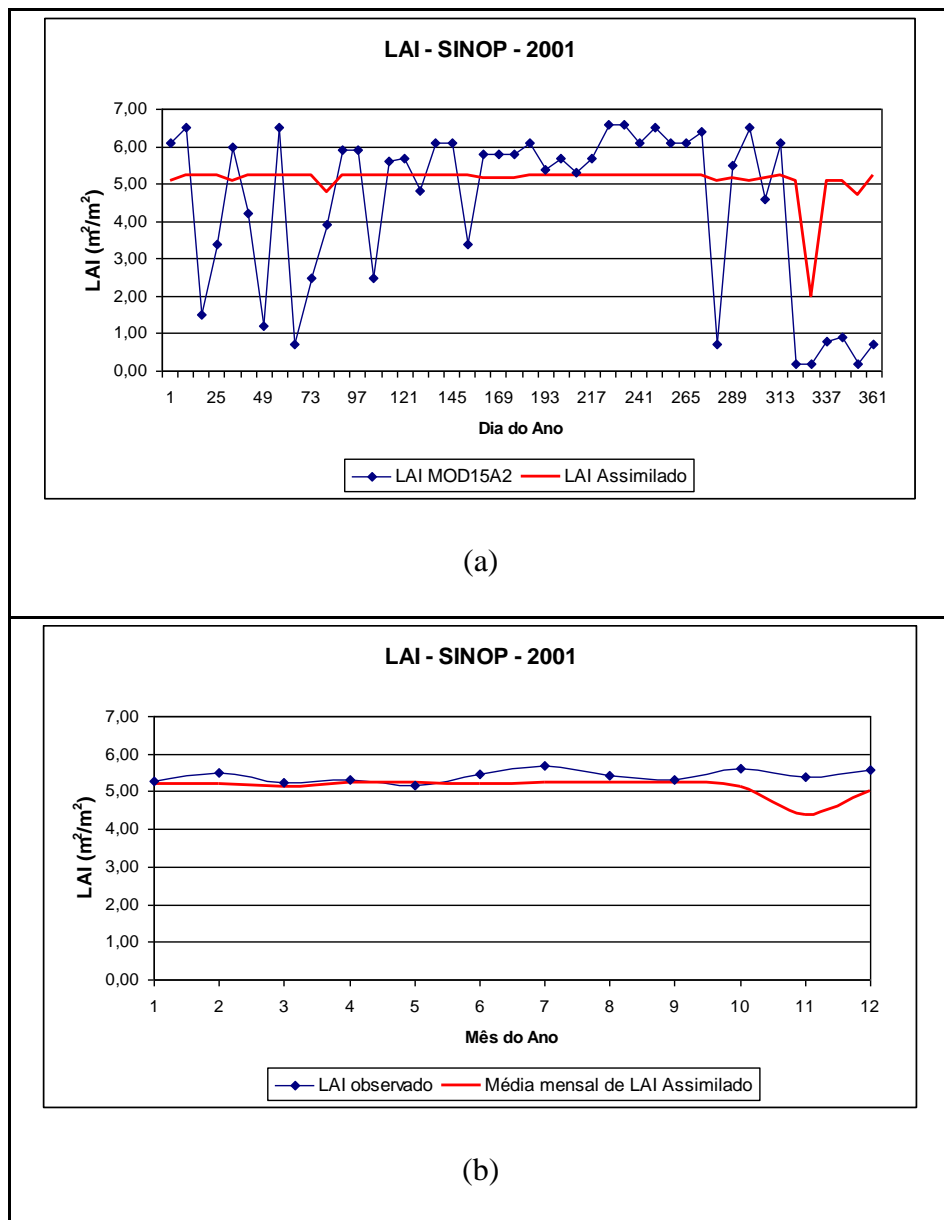


Figura 34. (a) Série temporal de LAI do MOD15A2 e de LAI assimilado; (b) valores médios mensais de LAI observado e de LAI assimilado; para o sítio SINOP em 2001.

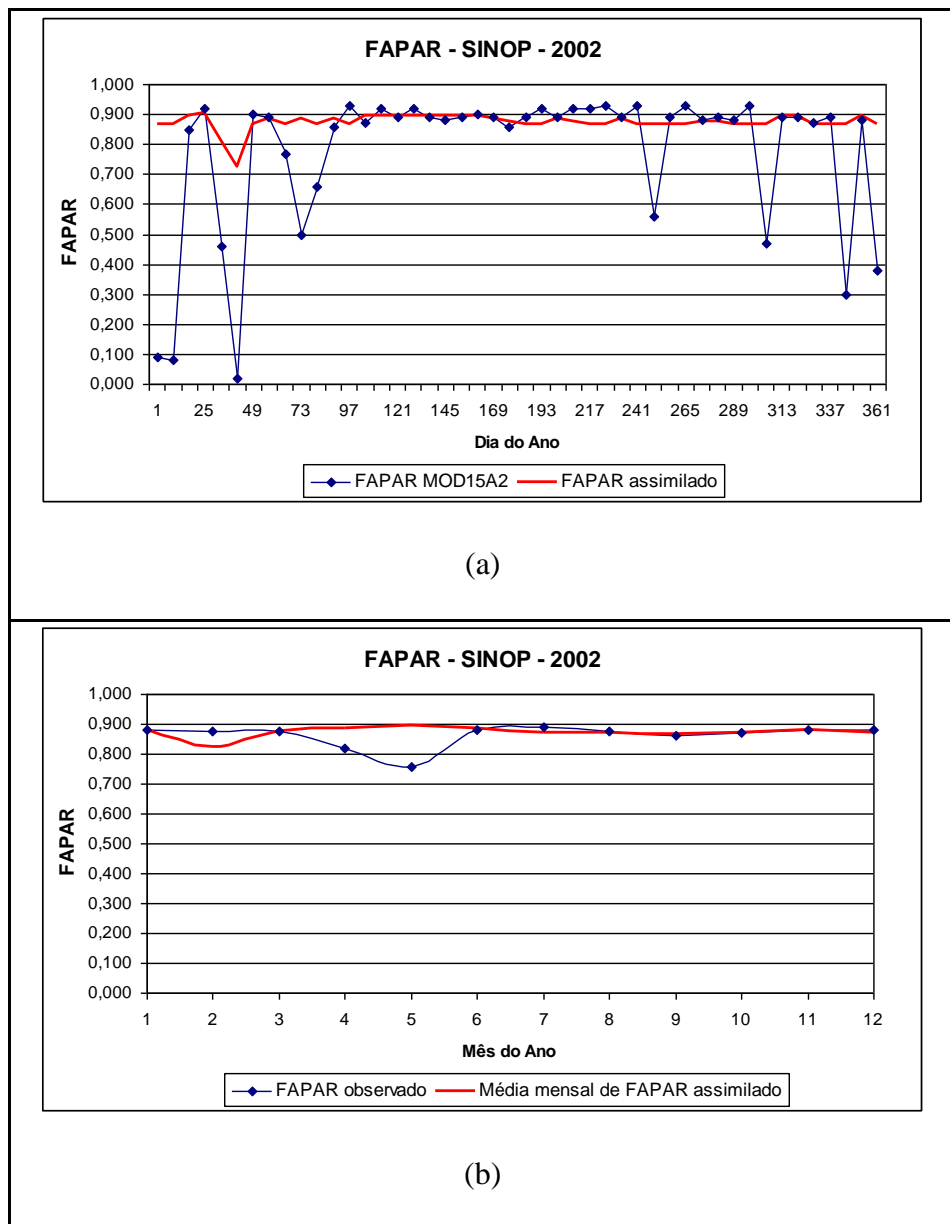


Figura 35. (a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio SINOP em 2002.

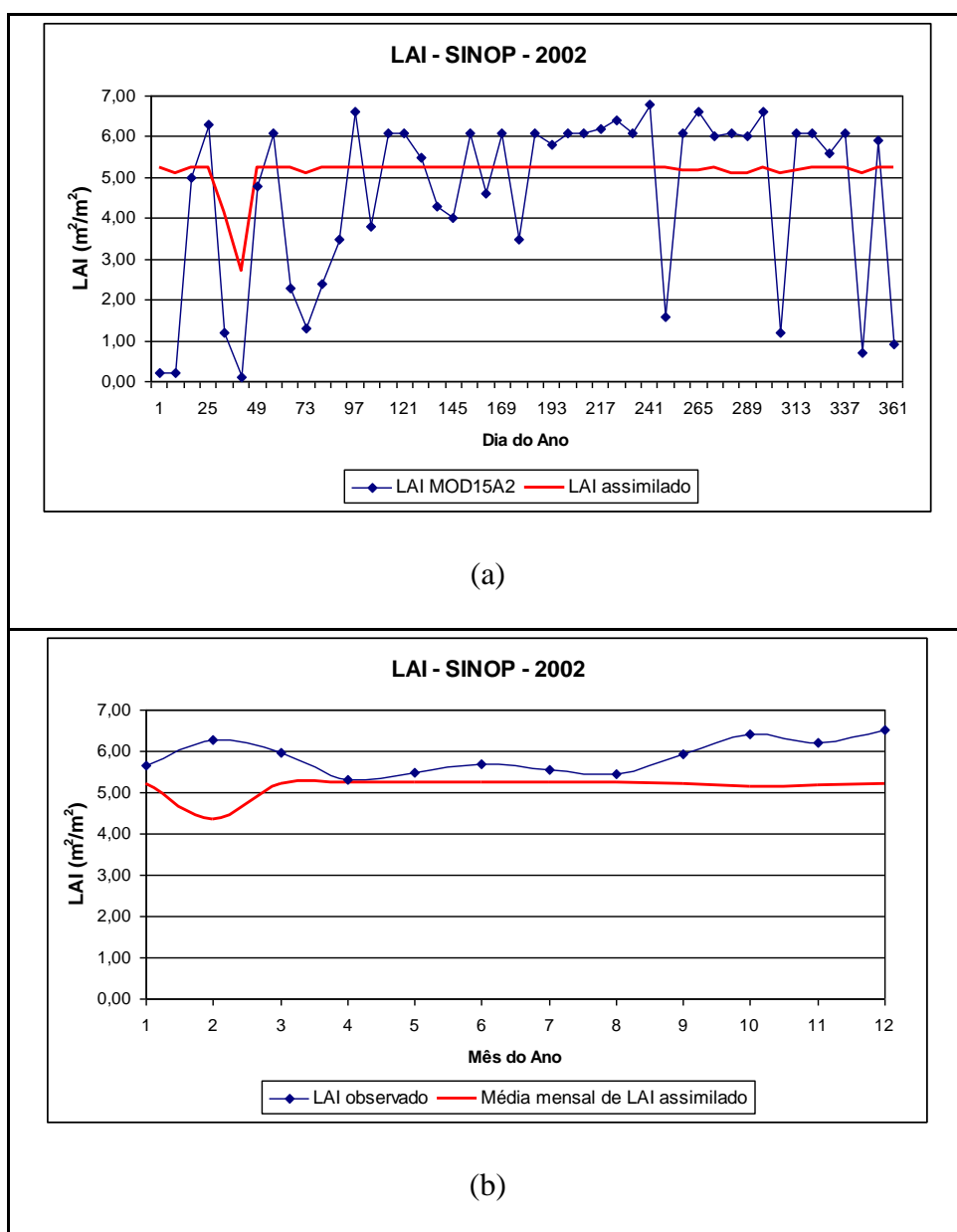


Figura 36. (a) Série temporal de LAI do MOD15A2 e de LAI assimilado; (b) valores médios mensais de LAI observado e de LAI assimilado; para o sítio SINOP em 2002.

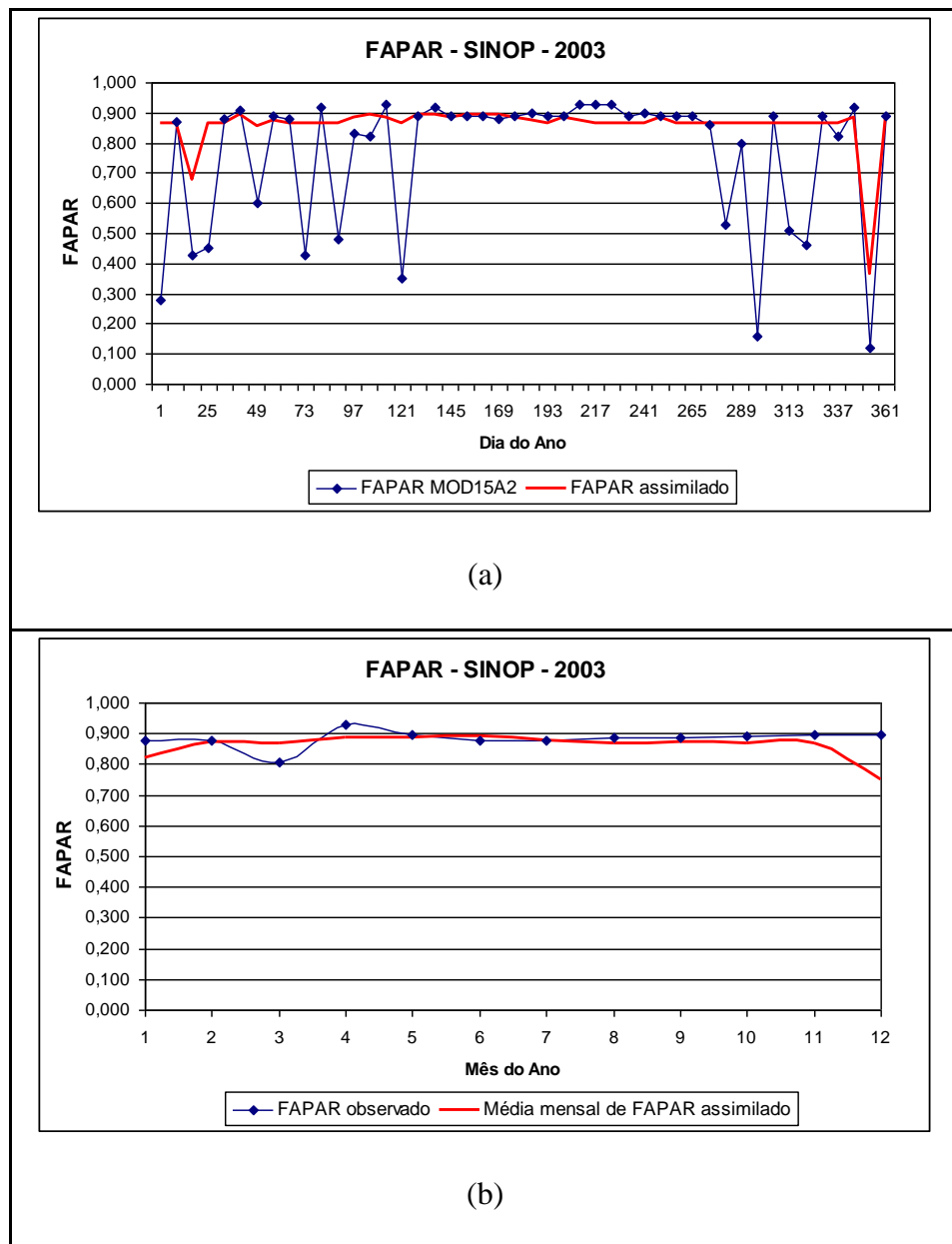


Figura 37. (a) Série temporal de FAPAR do MOD15A2 e de FAPAR assimilado; (b) valores médios mensais de FAPAR observado e de FAPAR assimilado; para o sítio SINOP em 2003.

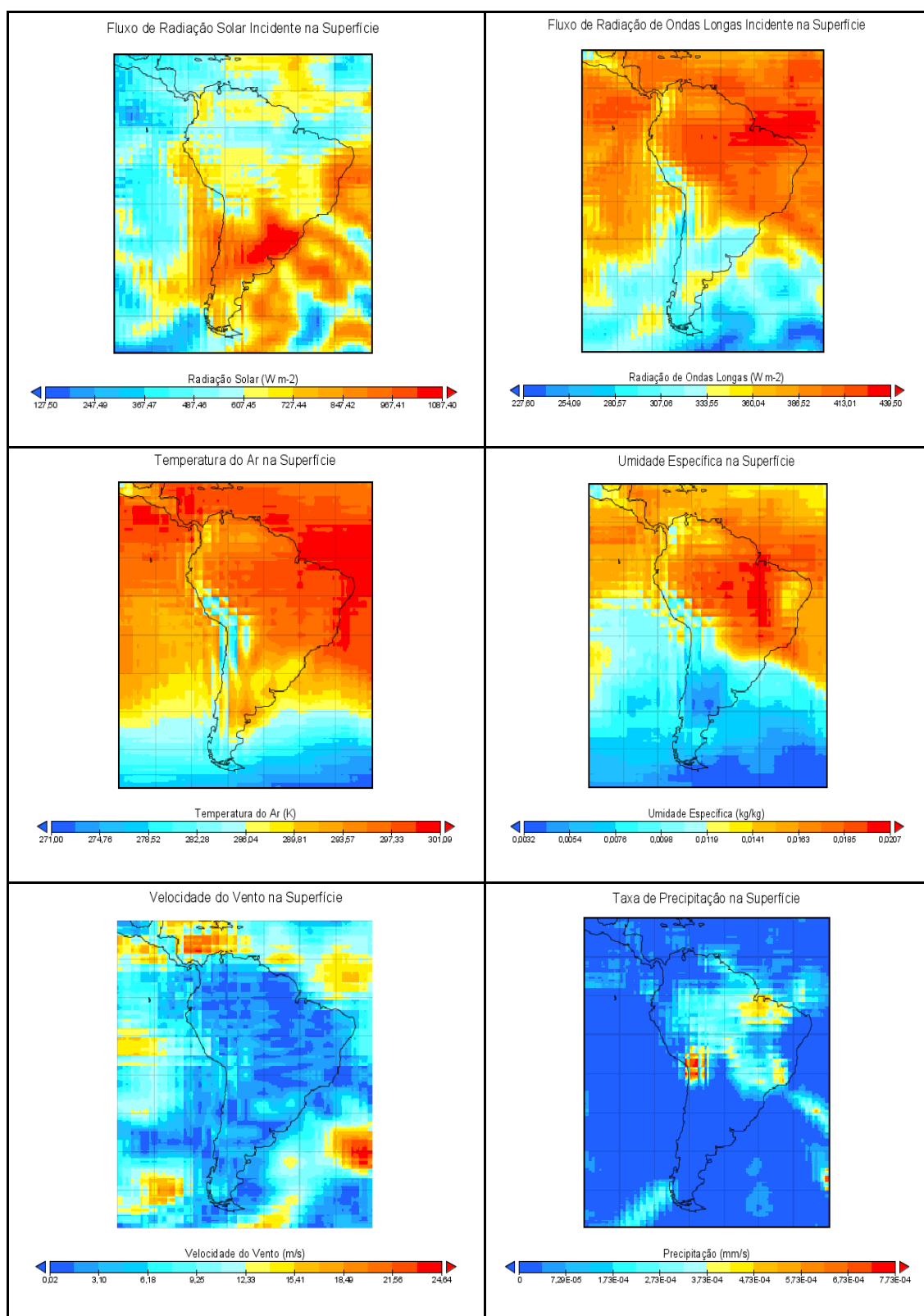


Figura 38. Mapas com os Campos das variáveis meteorológicas de S_{in} , L_{in} , T_a , q_a , u_a e P assimiladas para o dia 01 de janeiro de 2004 as 12 h UTC.

(ANPP) de $0,7052 \pm 0,1046$ (Tabela 5).

Os dois sítios que tiveram os incrementos de biomassa acompanhados ao longo do ano, KM67 e BA712, apresentaram valores médios da NPP iguais a $1,055 \pm 0,214$ kg C/m² para o sítio KM67 no ano de 2004 e $1,366 \pm 0,095$ kg C/m² para o sítio BA712 no ano de 2006 (Tabela 6).

Os valores da NPP que foram obtidos a partir da estimativa anual da NPPw e dos resultados de alocação média de biomassa para o sítio KM67 são apresentados na Tabela 7 com a NPP estimada para o sítio KM67 de $1,230$ kg C/m² no ano de 2001, para o sítio ZF-2 de $1,063$ kg C/m² no ano de 2001 e $1,356$ kg C/m² no ano de 2002, para o sítio UFAC de $1,343$ kg C/m² no ano de 2001 e $1,299$ kg C/m² no ano de 2002.

3.4.2. Dados do MOD17A3

Os valores médios da NPP obtidos a partir do MOD17A3 para os sítios pertencentes ao projeto LBA (KM67, ZF-2 e UFAC) e para o sítio de Mata Atlântica (BA712) são apresentados na Tabela 8 com a NPP estimada para o sítio KM67 de $0,966 \pm 0,150$ kg C/m² no ano de 2001 e $0,582 \pm 0,121$ kg C/m² no ano de 2004, para o sítio ZF-2 de $1,019 \pm 0,124$ kg C/m² no ano de 2001 e $1,093 \pm 0,138$ kg C/m² no ano de 2002, para o sítio UFAC de $0,988 \pm 0,094$ kg C/m² no ano de 2001 e $0,874 \pm 0,066$ kg C/m² no ano de 2002, para o sítio BA712 de $1,314 \pm 0,020$ kg C/m² no ano de 2006.

Esses valores de NPP deixam evidente uma tendência do produto MOD17A3 em subestimar os valores de NPP para os sítios de floresta tropical quando comparados com os valores de NPP observados.

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão da alocação de biomassa observada para o sítio KM67 em 2004.

	$\frac{NPP_w}{TNPP}$	$\frac{NPP_f}{TNPP}$	$\frac{NPP_{cr}}{TNPP}$	$\frac{NPP_{fr}}{TNPP}$	$\frac{ANPP}{TNPP}$	$\frac{BNPP}{TNPP}$	$\frac{NPP_f}{NPP_w}$	$\frac{BNPP}{ANPP}$
Média	0,2062	0,3825	0,0288	0,3825	0,5887	0,4113	2,3693	0,7052
DP	0,0872	0,0493	0,0126	0,0493	0,0380	0,0380	1,5910	0,1046

Onde TNPP é a NPP Total; NPPcr é a NPP das raízes grossas; e NPPfr é a NPP das raízes finas.

Tabela 6. Valores médios com desvio padrão da NPP observada para o sítio KM67 em 2004 e para o sítio BA712 em 2006.

		NPP Observada
Sítio	Ano	(kg C m⁻² ano⁻¹)
KM67	2004	1,055±0,214
BA712	2006	1,366±0,095

Tabela 7. Valores da NPP observada para o sítio KM67 em 2001, para o sítio ZF-2 em 2001 e 2002, e para o sítio UFAC em 2001 e 2002.

		NPP Observada
Sítio	Ano	(kg C m⁻² ano⁻¹)
KM67	2001	1,230
ZF-2	2001	1,063
ZF-2	2002	1,356
UFAC	2001	1,343
UFAC	2002	1,299

Tabela 8. Valores médios da NPP com desvio padrão obtidos a partir do MOD17A3 para o sítio KM67 em 2001 e 2004, para o sítio ZF-2 em 2001 e 2002, para o sítio UFAC em 2001 e 2002, e para o sítio BA712 em 2006.

		NPP MOD17A3
Sítio	Ano	(kg C m⁻² ano⁻¹)
KM67	2001	0,966±0,150
KM67	2004	0,582±0,121
ZF-2	2001	1,019±0,124
ZF-2	2002	1,093±0,138
UFAC	2001	0,988±0,094
UFAC	2002	0,874±0,066
BA712	2006	1,314±0,020

3.5. Calibração do Modelo SITE

O valor médio, o erro relativo e os coeficientes ρ , α e RMSE entre os dados observados e simulados, para as simulações com parâmetros calibrados, para o Sítio KM67, são apresentados na Tabela 9.

Com o novo conjunto de parâmetros calibrados (Tabela 10), obteve-se os resultados para os valores dos fluxos simulados de R_n com um erro relativo de 3,15%, de PAR_i com um erro relativo de 3,89%, de H com um erro relativo de 3,73%, de LE com um erro relativo de 2,79% e de NEE com um erro relativo de 5,79%. Os valores dos fluxos de R_n , PAR_i , H , LE e NEE para o período de simulação apresentaram um excelente ajuste, como pode ser visualizado nas Figuras 39 a 43, com os coeficientes de ajuste $\rho = 0,99$, $\alpha = 0,98$ e $RMSE = 36,67 \text{ W m}^{-2}$ para R_n ; $\rho = 1,00$, $\alpha = 0,95$ e $RMSE = 30,11 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para PAR_i ; $\rho = 0,79$, $\alpha = 0,77$ e $RMSE = 42,99 \text{ W m}^{-2}$ para H ; $\rho = 0,72$, $\alpha = 0,66$ e $RMSE = 96,36 \text{ W m}^{-2}$ para LE ; $\rho = 0,85$, $\alpha = 0,70$ e $RMSE = 2,53 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para NEE .

As Figuras 44 a 46 apresentam os resultados dos coeficientes ρ , α e RMSE para H , LE e NEE em função dos parâmetros $V_{m\acute{a}x}$ e m , considerando: os valores calibrados para as taxas de respiração das raízes grossas, das raízes finas, dos galhos e troncos iguais aos valores iniciais multiplicados por um fator de 3; e os valores fixos de $C_u = 2,109 \times 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $C_s = 2,109 \times 10^4 \text{ J m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Os coeficientes ρ , α e RMSE para H (Figura 44) tendem a valores levemente piores com o aumento de $V_{m\acute{a}x}$, com os melhores resultados para $m = 7$. Na Figura 45 é possível verificar que os coeficientes ρ e RMSE para LE tendem a valores levemente piores com o aumento de $V_{m\acute{a}x}$, com os melhores resultados para $m = 7$, enquanto o coeficiente α tende a valores levemente melhores com o aumento de $V_{m\acute{a}x}$ e de m . Para NEE (Figura 46), o coeficiente ρ apresenta valores levemente melhores com o aumento de $V_{m\acute{a}x}$, sendo praticamente insensível à variação de m ; o coeficiente α tende a valores

Tabela 9. Valores médios, erro relativo, ρ , α e RMSE entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto de parâmetros calibrados para o Sítio KM67. As unidades referem-se aos valores médios e RMSE, pois ρ e α são adimensionais.

		Rn (W m ⁻²)	PARi (μmol m ⁻² s ⁻¹)	H (W m ⁻²)	LE (W m ⁻²)	NEE (kg C ha ⁻¹ h ⁻¹)
Observado	Médio	136,66	363,36	35,38	126,04	-1,21
Calibrado	Médio	132,36	349,21	36,70	129,56	-1,28
	 Erro (%)	3,15	3,89	3,73	2,79	5,79
	ρ	0,99	1,00	0,79	0,72	0,85
	α	0,98	0,95	0,77	0,66	0,70
	RMSE	36,67	30,11	42,99	96,36	2,53

Tabela 10. Parâmetros não calibrados (Iniciais) e parâmetros calibrados para o Sítio KM67.

	V_{máx} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	m	Cs (J m ⁻² °C ⁻¹)	Cu (J m ⁻² °C ⁻¹)
Inicial	75. x 10 ⁻⁶	10	1,254 x 10 ⁵	1,254 x 10 ⁵
Calibrado	85. x 10 ⁻⁶	7	2,109 x 10 ⁴	2,109 x 10 ³

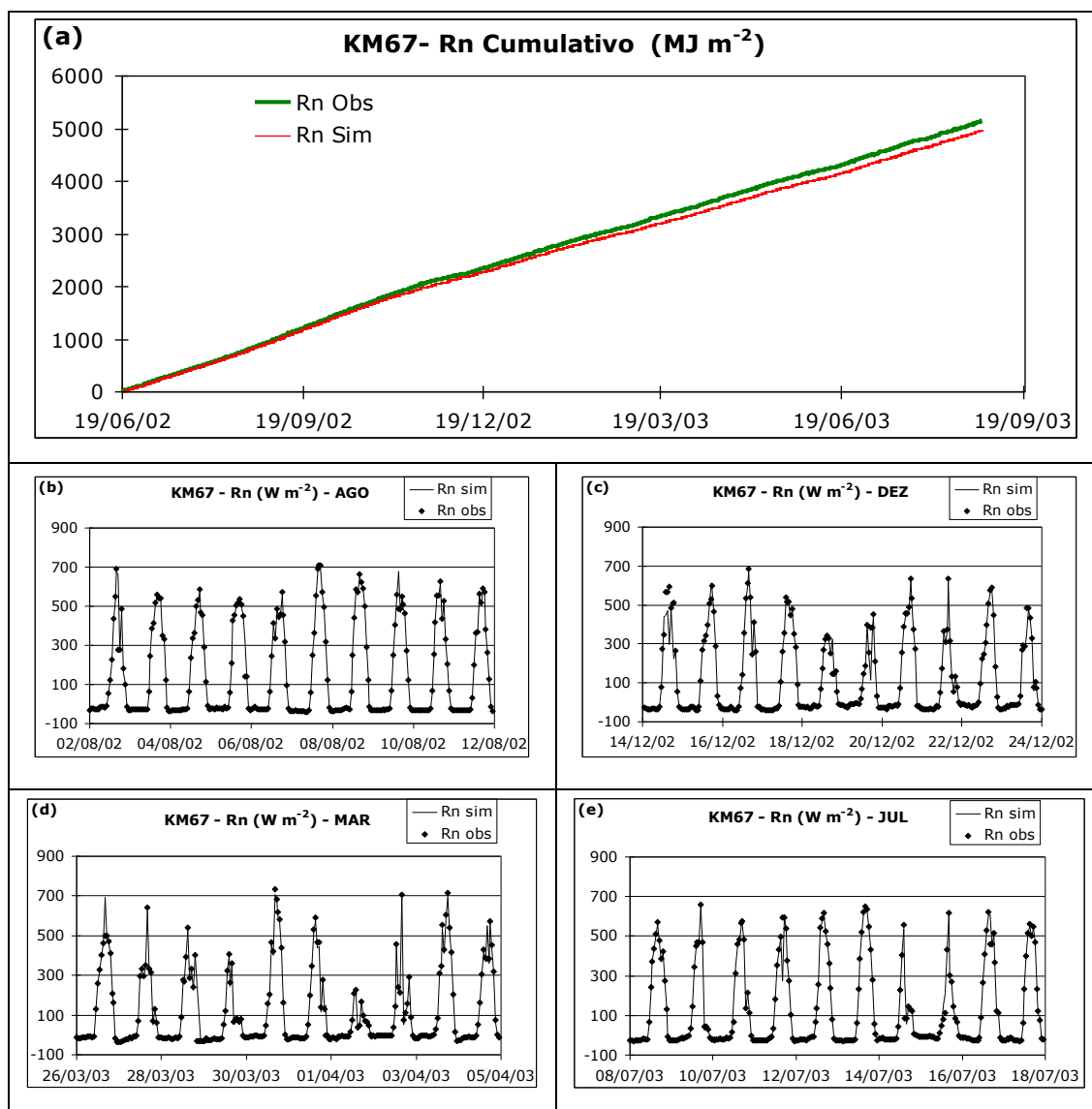


Figura 39 – Gráfico cumulativo de (a) Rn; (b), (c), (d) e (e) gráficos de Rn observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.

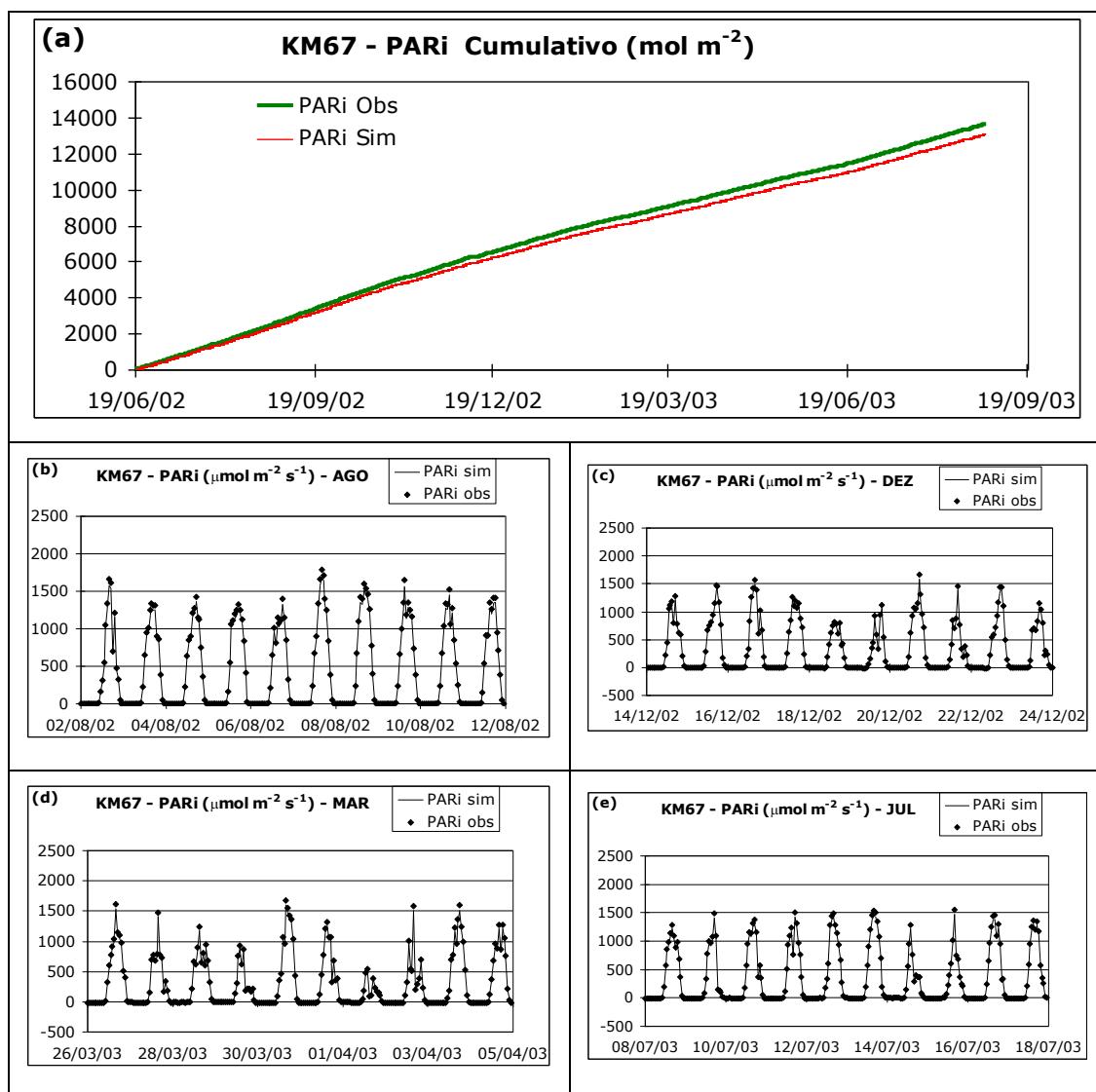


Figura 40 – Gráfico cumulativo de (a) PARi; (b), (c), (d) e (e) gráficos de PARi observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.

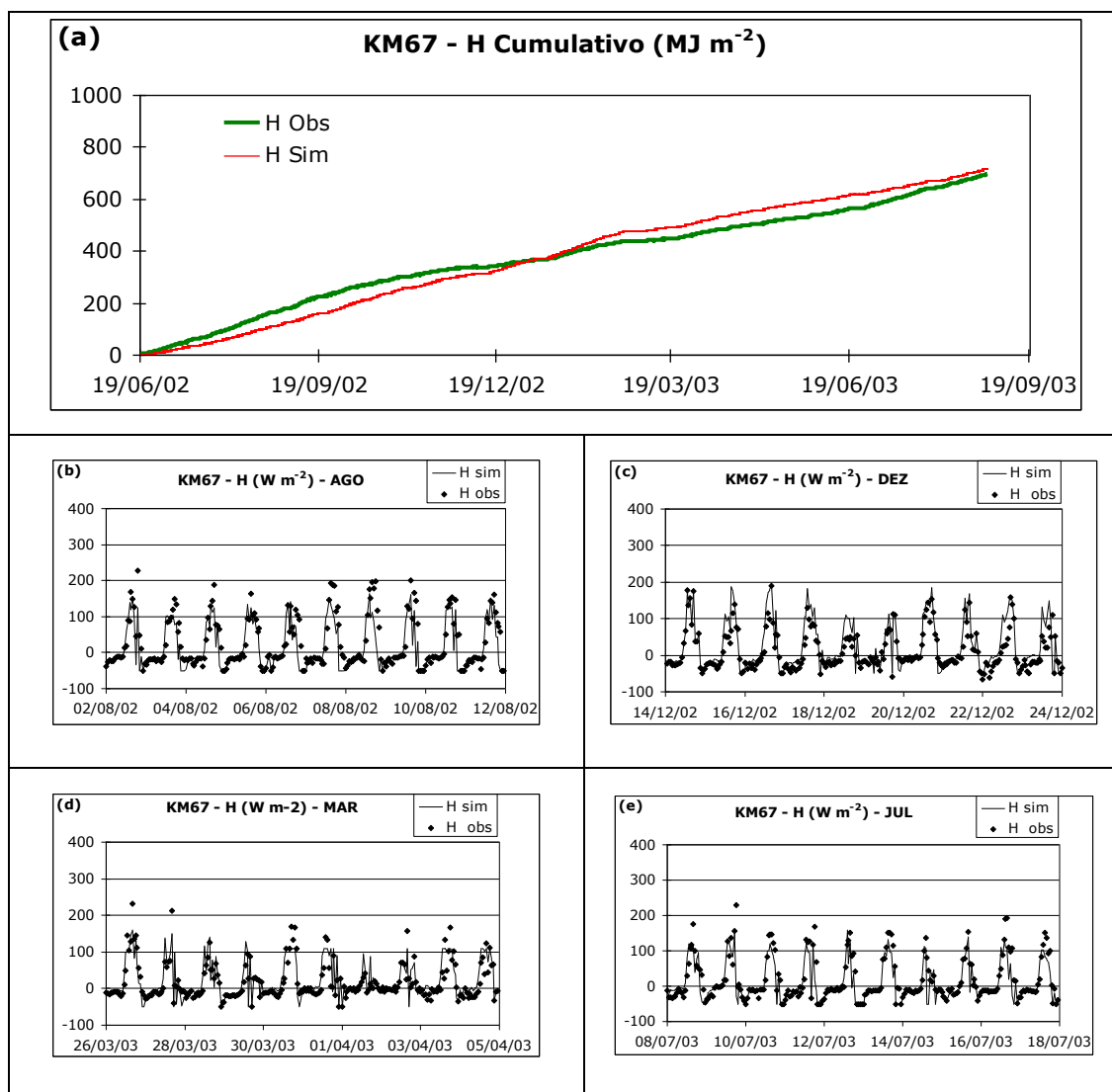


Figura 41 – Gráfico cumulativo de (a) H; (b), (c), (d) e (e) gráficos de H observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.

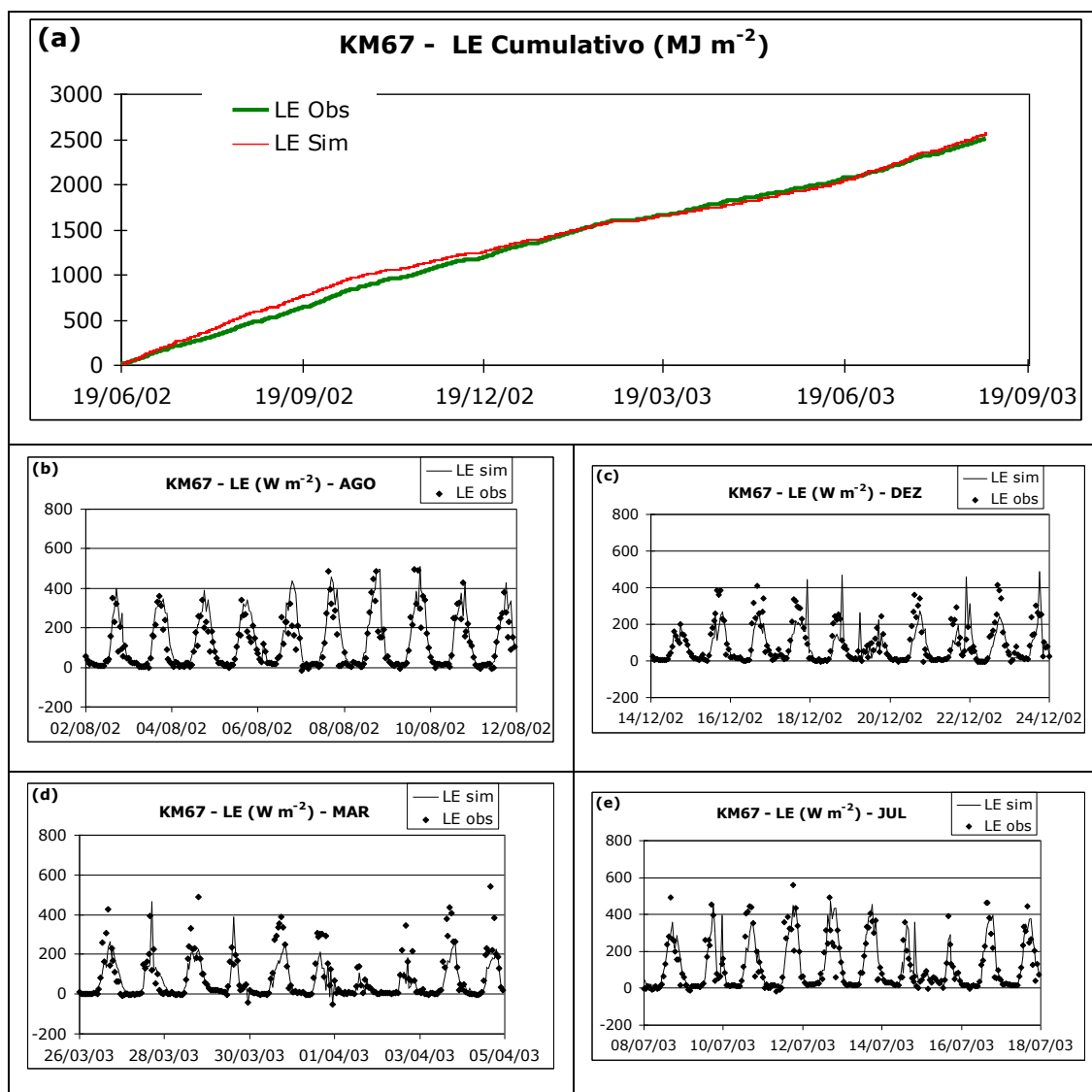


Figura 42 – Gráfico cumulativo de (a) LE; (b), (c), (d) e (e) gráficos de LE observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.

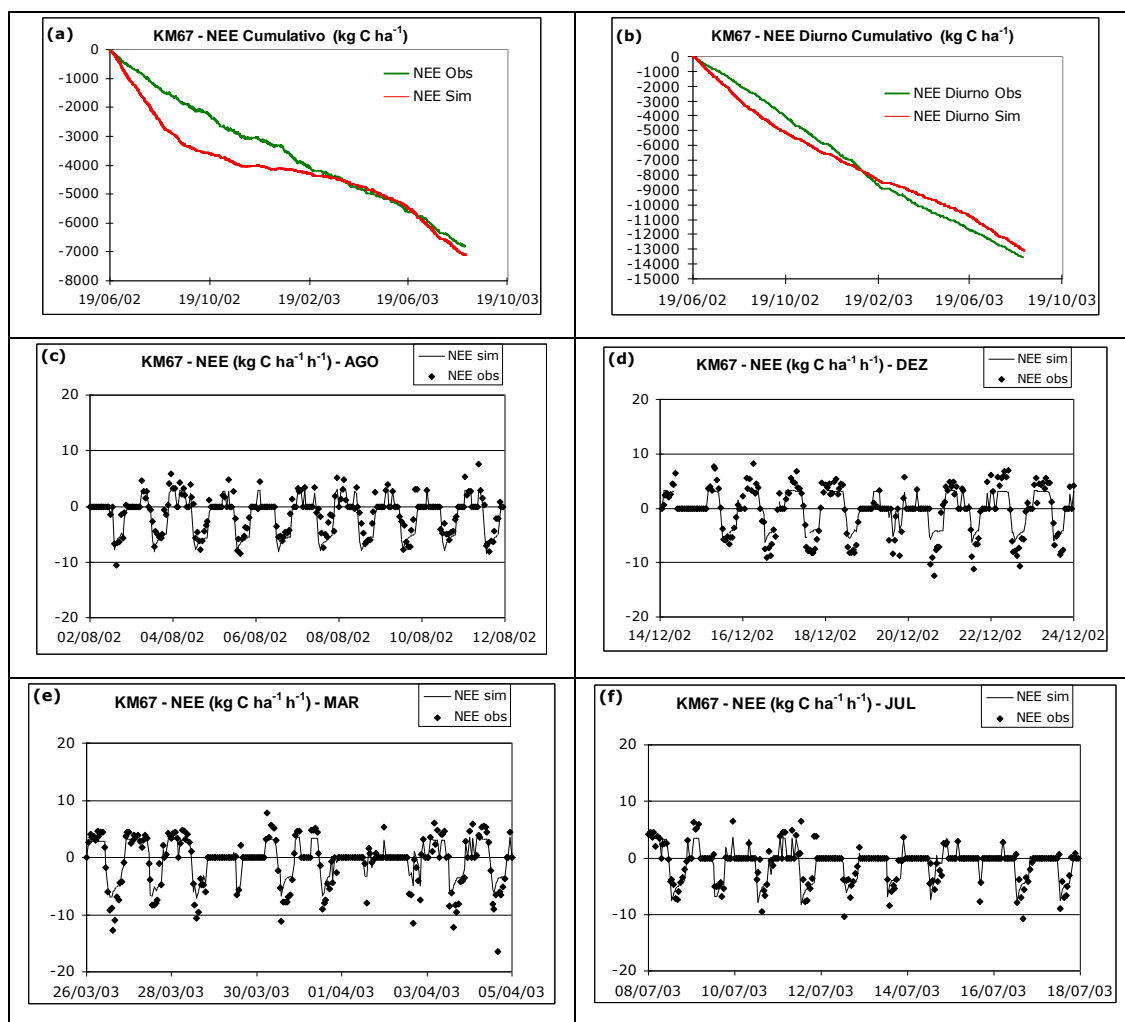


Figura 43 – Gráfico cumulativo de (a) NEE Total e (b) NEE Diurno; (c), (d), (e) e (f) gráficos de NEE observado e simulado, para períodos selecionados nos meses de agosto e dezembro de 2002 e março e julho de 2003; para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$, para o Sítio KM67.

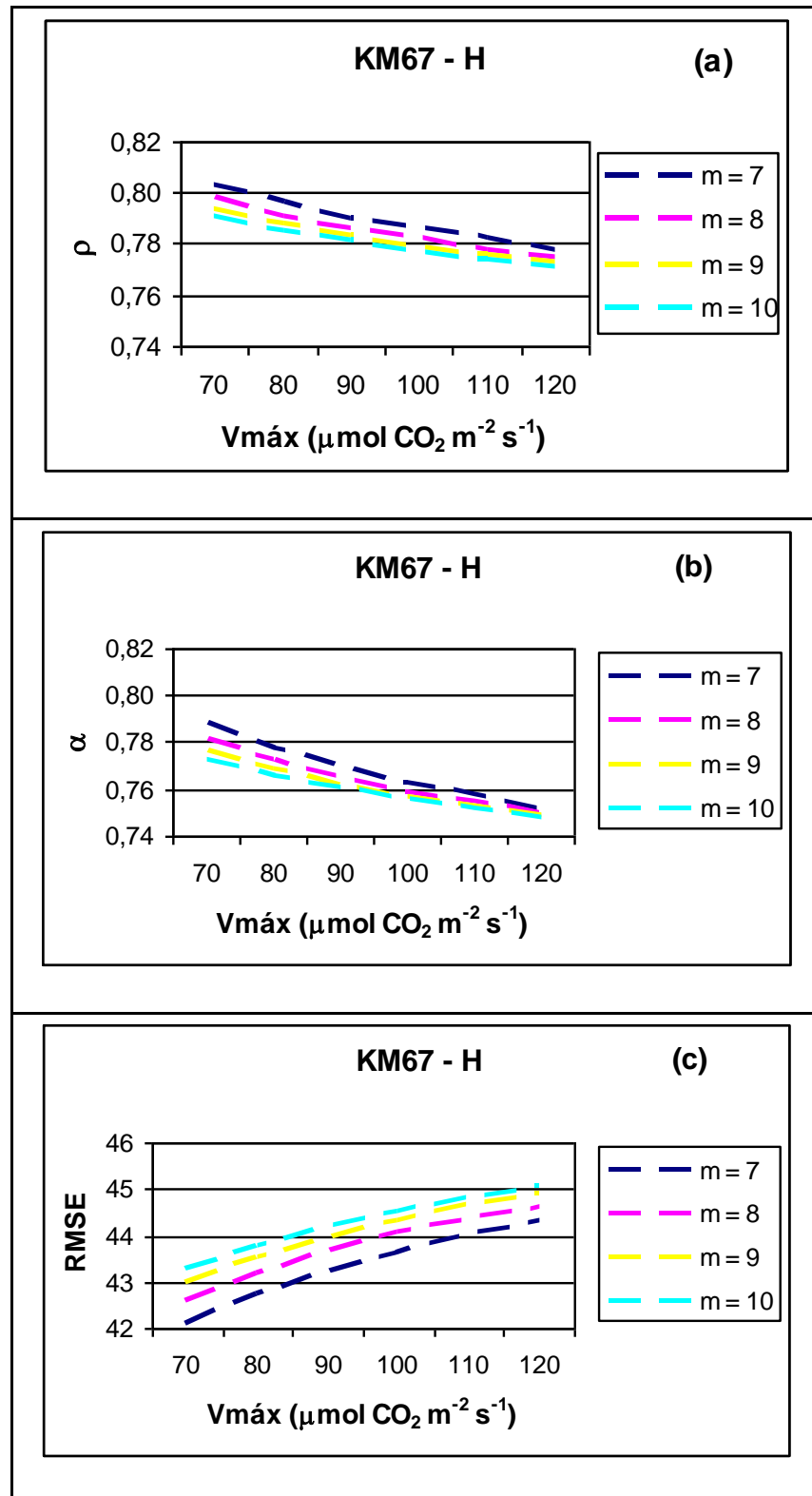


Figura 44. Gráfico de (a) ρ , (b) α e (c) RMSE para H no Sítio KM67 em função de $V_{m\acute{a}x}$ e m , para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$.

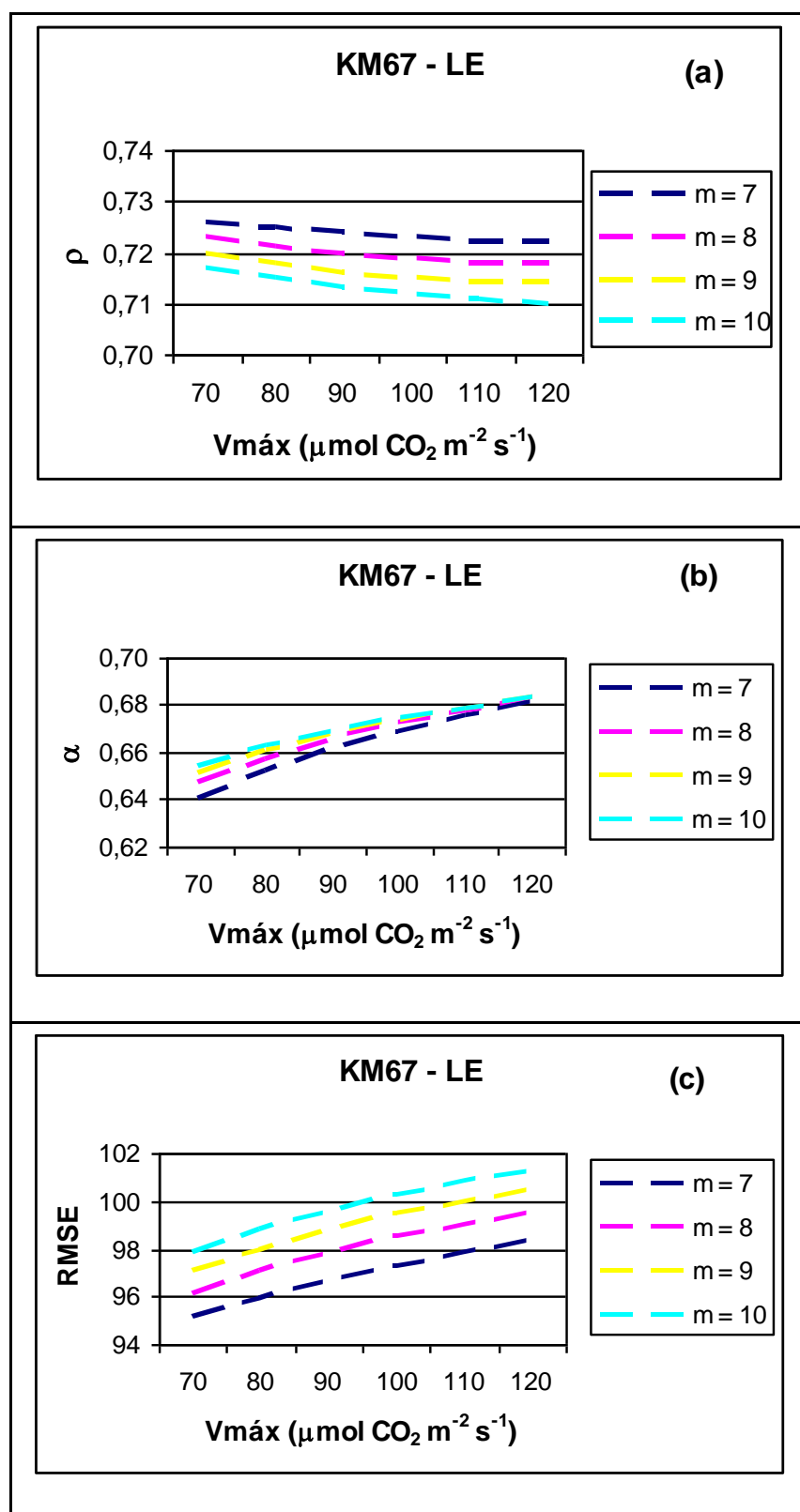


Figura 45. Gráfico de (a) ρ , (b) α e (c) RMSE para LE no Sítio KM67 em função de $V_{\text{máx}}$ e m , para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$.

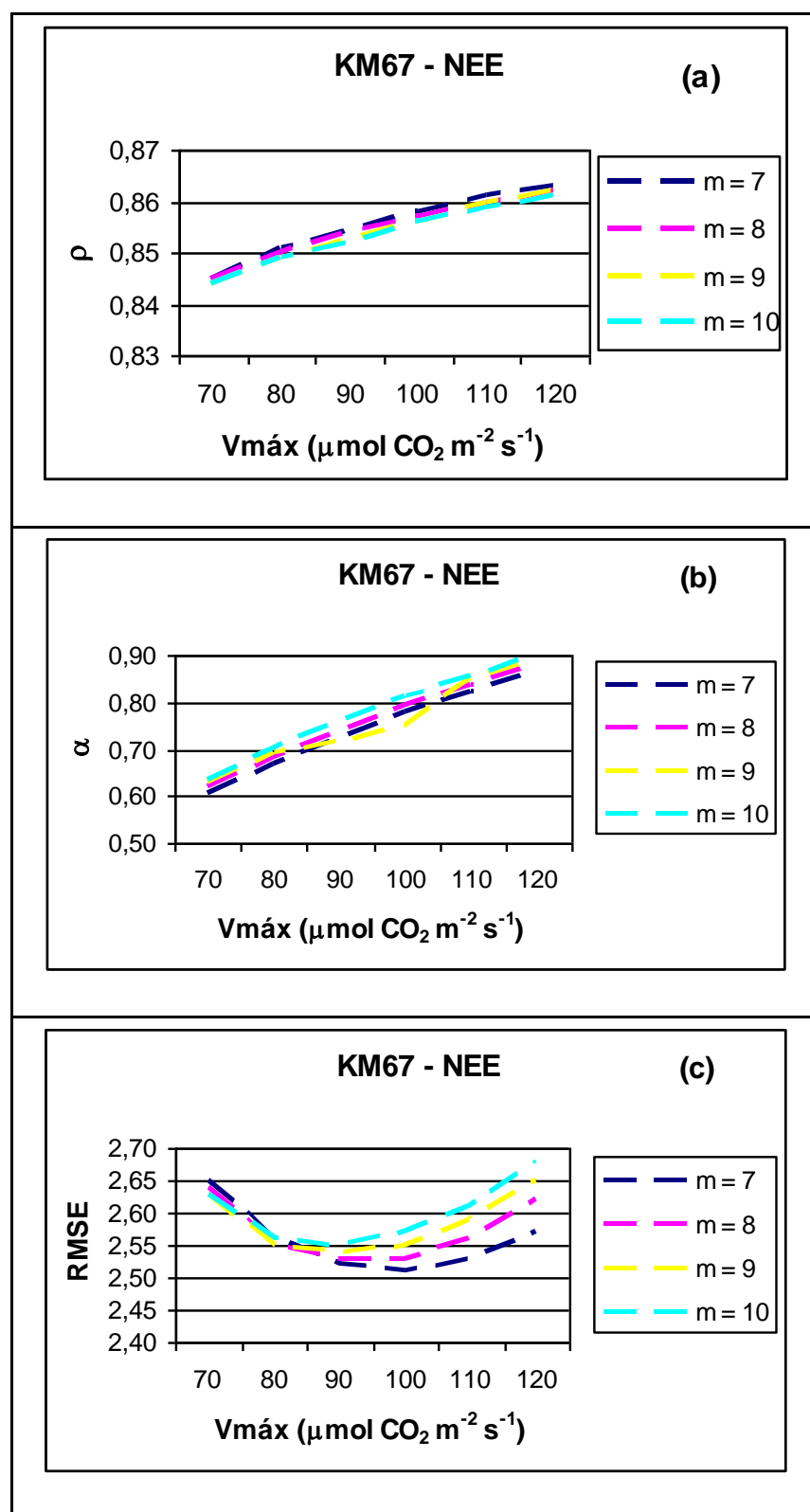


Figura 46. Gráfico de (a) ρ , (b) α e (c) RMSE para NEE no Sítio KM67 em função de $V_{\text{máx}}$ e m , para dados com $u^* > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ e $\delta = 0,4$.

consideravelmente melhores com o aumento de $V_{\text{máx}}$, sendo pouco sensível a variação de m ; e o coeficiente RMSE tende a valores pouco melhores com o aumento de $V_{\text{máx}}$, tendo um melhor ajuste para os valores entorno de $V_{\text{máx}} = 100 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $m = 7$.

A partir desses resultados pode-se constatar que o valor de $V_{\text{máx}} = 85 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ produziu um melhor ajuste para a NPP com um erro relativo de 0,57% entre o valor simulado e o valor observado para 2004 (Tabela 11), e um erro relativo de 0,59% e $\text{RMSE} = 0,17$ para o LAI entre os valores simulados e os valores observados para 2004 (Figura 47 e Tabela 17).

Tabela 11. NPP observada, NPP Simulada pelo SITE e erro relativo para o Sítio KM67 em 2004.

		NPP Observada	NPP SITE	
Sítio	Ano	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	Erro (%)
KM67	2004	1,055	1,049	0,57

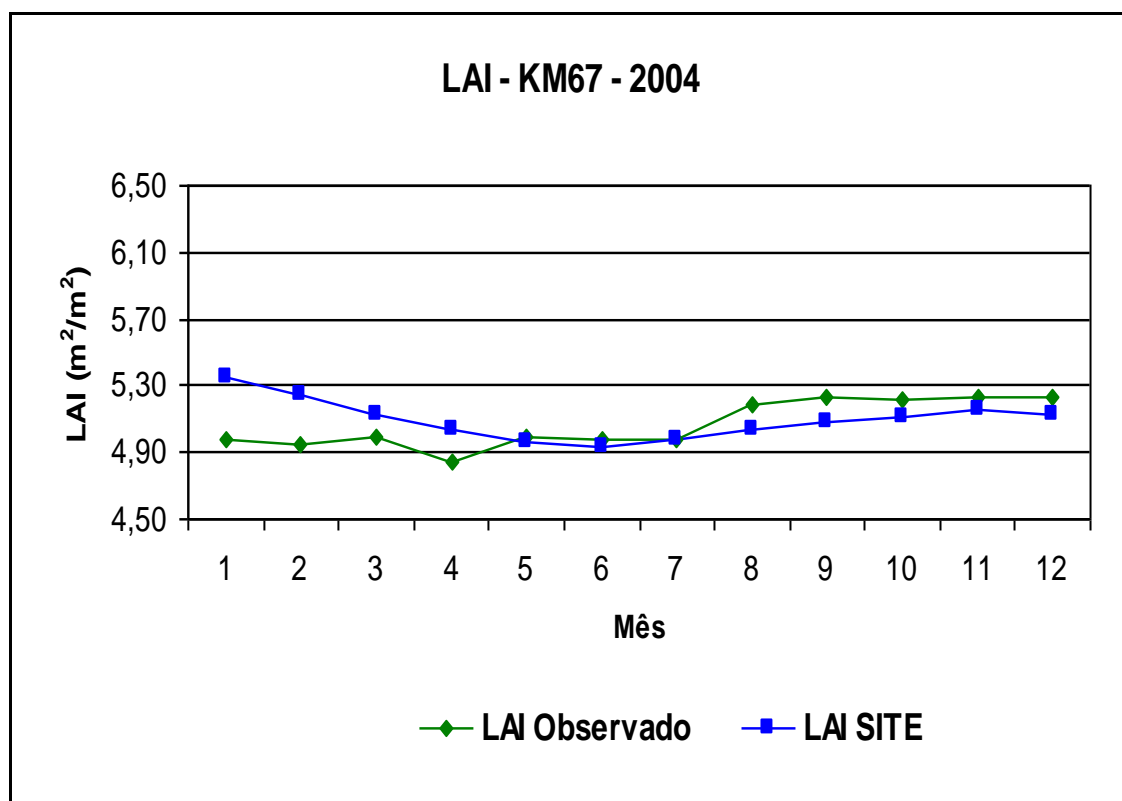


Figura 47. LAI observado e LAI Simulado pelo SITE para o Sítio KM67 em 2004.

3.6. Quantificação do Erro para os Sítios KM67 e BA712

A quantificação do erro introduzido nas estimativas ao se usar variáveis meteorológicas assimiladas, ao invés de variáveis coletadas localmente, foi avaliada nos sítios KM67 e BA712. Primeiramente foram avaliados os valores médios das variáveis meteorológicas de Ta, qa, ua, Sin, Lin e P, e os coeficientes RMSE e erro relativo entre os valores das variáveis meteorológicas assimiladas a partir dos dados de re-análise do NCEP/NCAR e os valores das variáveis observadas para os sítios KM67 e BA712 (Tabelas 12 e 13). As Figuras 48 a 59 apresentam os gráficos de comparação entre estes valores para o período de 2002 a 2004 no sítio KM67 e para o ano de 2006 no sítio BA712.

Os valores das variáveis meteorológicas Ta, qa, ua e Lin assimiladas a partir da re-análise do NCEP apresentaram bons resultados quando comparados com os valores observados para um mesmo período no sítio KM67, com um erro relativo de 0,09% e RMSE igual a 1,71 K para Ta; um erro relativo de 5,36% e RMSE igual a 0,0021 kg/kg para qa; um erro relativo de 6,18% e RMSE igual a 1,54 m/s para ua; um erro relativo de 8,86% e RMSE igual a 50,13 W m⁻² para Lin. Para o sítio BA712, considerando as mesmas variáveis, apenas ua apresentou valores extremamente superestimados para o ano de 2006 com um erro relativo de 150,25% e RMSE igual a 3,72 m/s.

O grande erro relativo apresentado para ua no sítio BA712 com um valor médio para ua assimilado a partir de dados de re-análise do NCEP igual a $4,93 \pm 2,08$ m/s para o ano de 2006 está associado a uma influência de brisas marítimas sobre os dados de velocidade do vento devido à proximidade do sítio BA712 do litoral Baiano (Figura 9) e ao tamanho da célula de 2,5° dos dados originais de re-análise que geraram os dados assimilados de ua, diferente das condições encontradas para o sítio KM67.

Tabela 12. Valores médios com desvio padrão das variáveis meteorológicas de Ta, qa, ua, Sin, Lin e P, e os coeficientes RMSE, erro relativo e coeficiente de variação entre os valores das variáveis assimiladas a partir dos dados de re-análise do NCEP e os valores das variáveis observadas para o sítio KM67 no período de 2004 a 2006.

Variável	Unidade	Observada	NCEP	RMSE	$ Erro $ (%)
Ta	K	298,16±1,59	297,88±1,52	1,71	0,09
Qa	kg/kg	0,0168±0,0017	0,0177±0,0013	0,0021	5,36
Ua	m/s	2,59±1,09	2,43±1,15	1,54	6,18
Sin	W/m ²	295,17±220,27	347,75±171,41	129,97	17,81
Lin	W/m ²	449,82±31,59	409,98±10,36	50,13	8,86
P	mm/h	0,18±1,46	0,29±0,29	1,48	61,11

Tabela 13. Valores médios com desvio padrão das variáveis meteorológicas de Ta, qa, ua, Sin, Lin e P, e os coeficientes RMSE, erro relativo e coeficiente de variação entre os valores das variáveis assimiladas a partir dos dados de re-análise do NCEP e os valores das variáveis observadas para o sítio BA712 no de 2006.

Variável	Unidade	Observada	NCEP	RMSE	$ Erro $ (%)
Ta	K	296,31±3,32	296,57±2,33	1,94	0,09
Qa	kg/kg	0,0159±0,0033	0,0148±0,0020	0,0032	6,92
Ua	m/s	1,97±1,08	4,93±2,08	3,72	150,25
Sin	W/m ²	345,12±293,81	406,71±201,40	207,46	17,85
Lin	W/m ²	404,36±15,81	386,91±19,32	24,62	4,32
P	mm/h	0,17±1,27	0,11±0,20	1,25	35,29

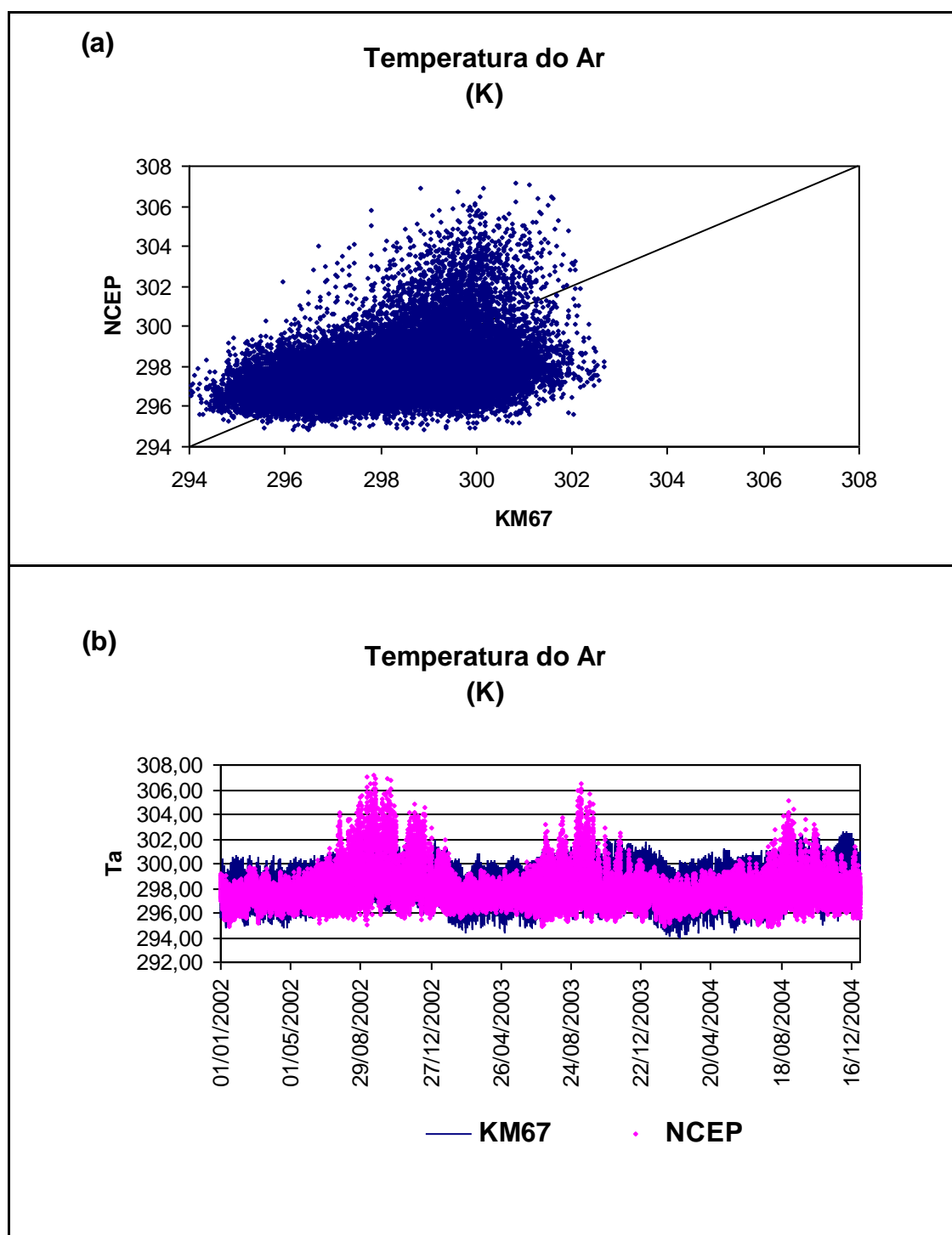


Figura 48. (a) Gráfico da relação entre T_a observado e T_a assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de T_a observado e T_a assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.

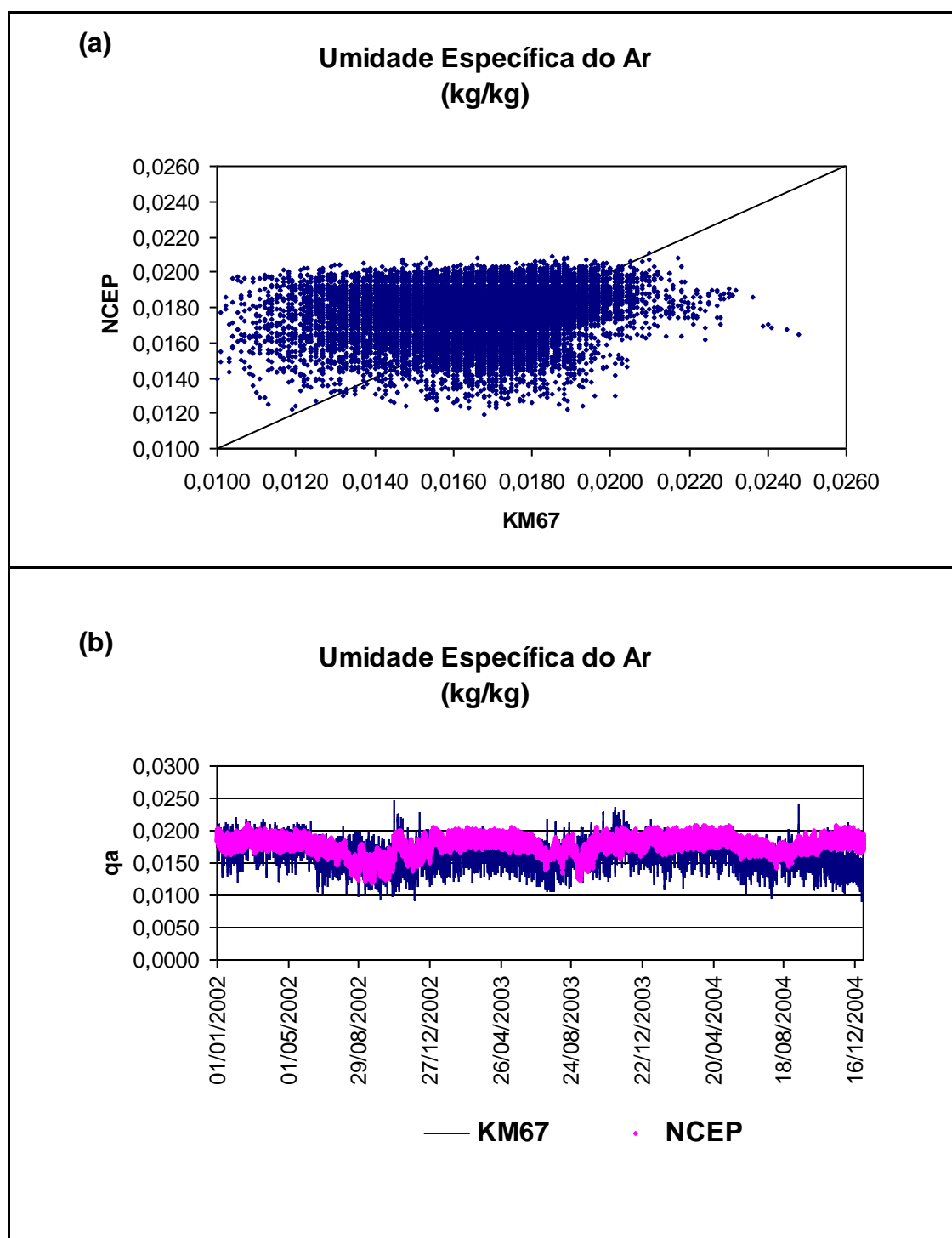


Figura 49. (a) Gráfico da relação entre q_a observado e q_a assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de q_a observado e q_a assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.

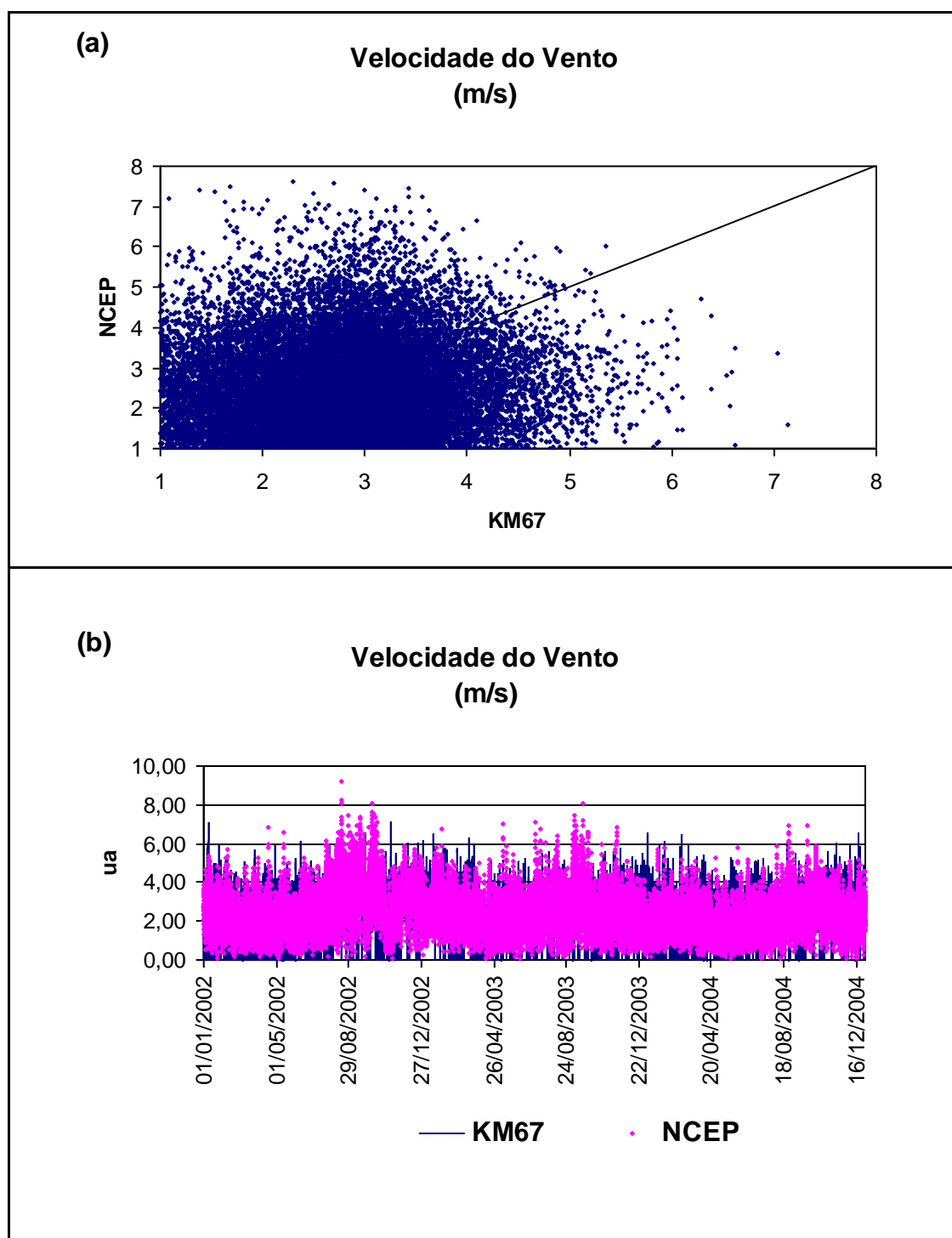


Figura 50. (a) Gráfico da relação entre ua observado e ua assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de ua observado e ua assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.

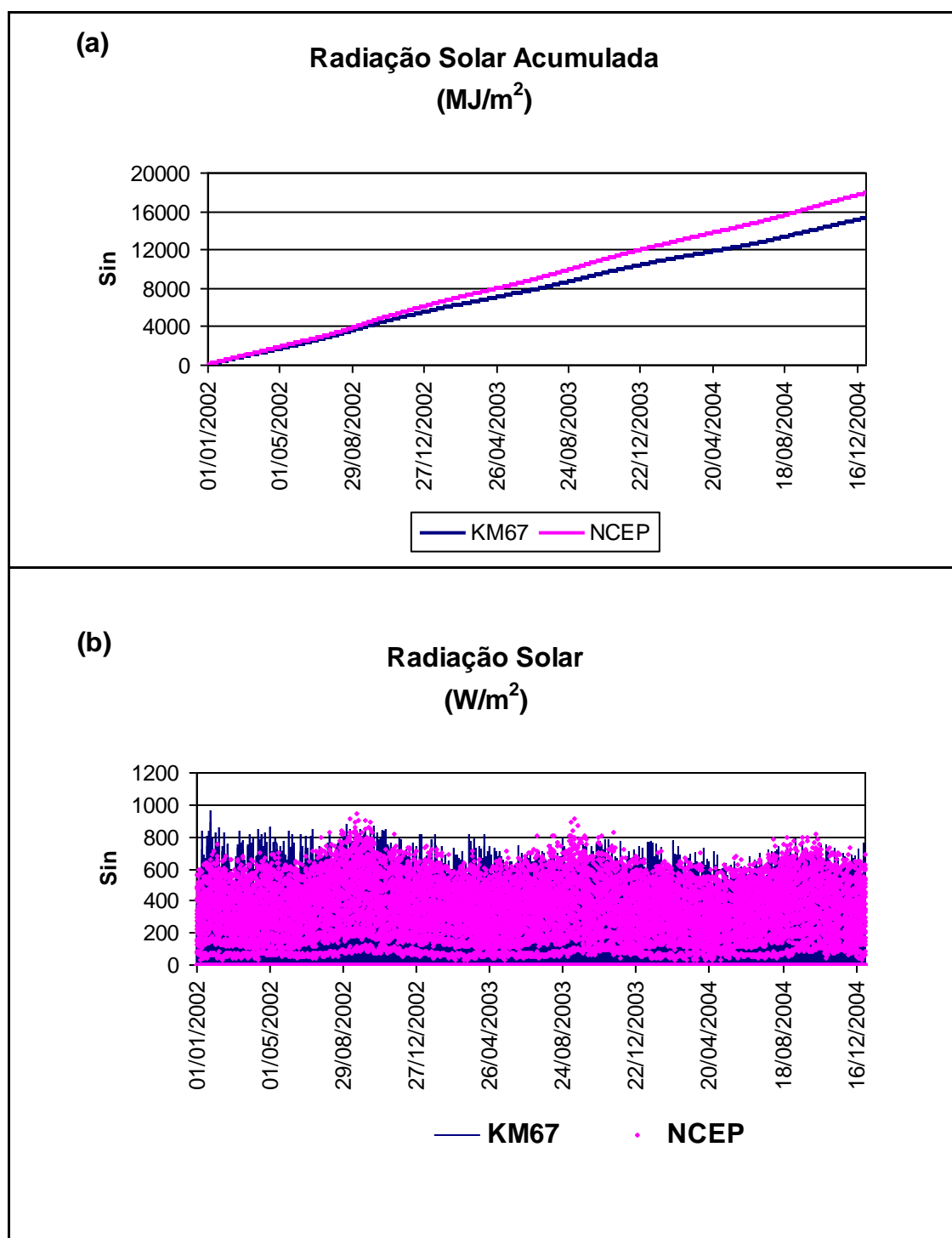


Figura 51. (a) Gráfico cumulativo de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.

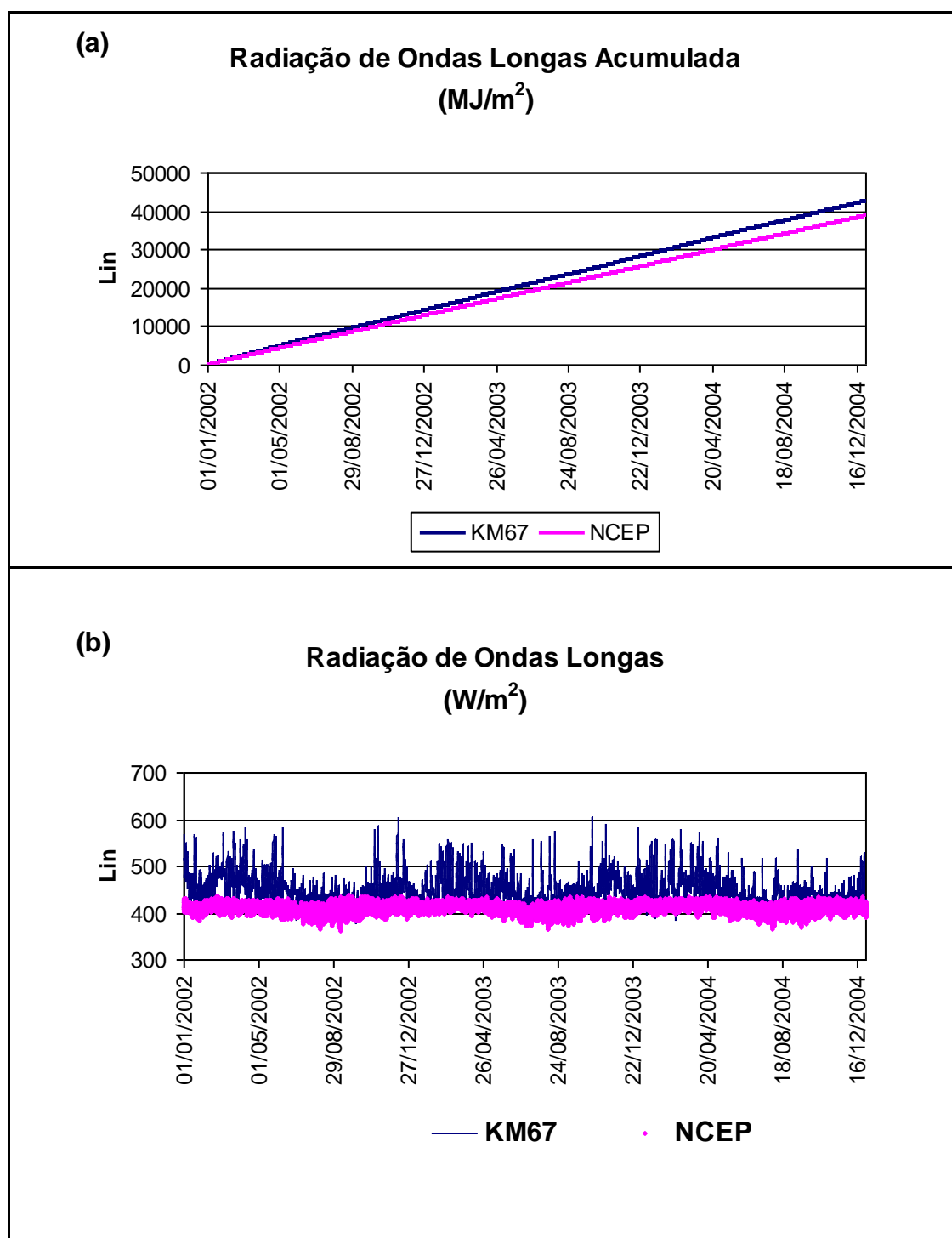


Figura 52. (a) Gráfico cumulativo de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.

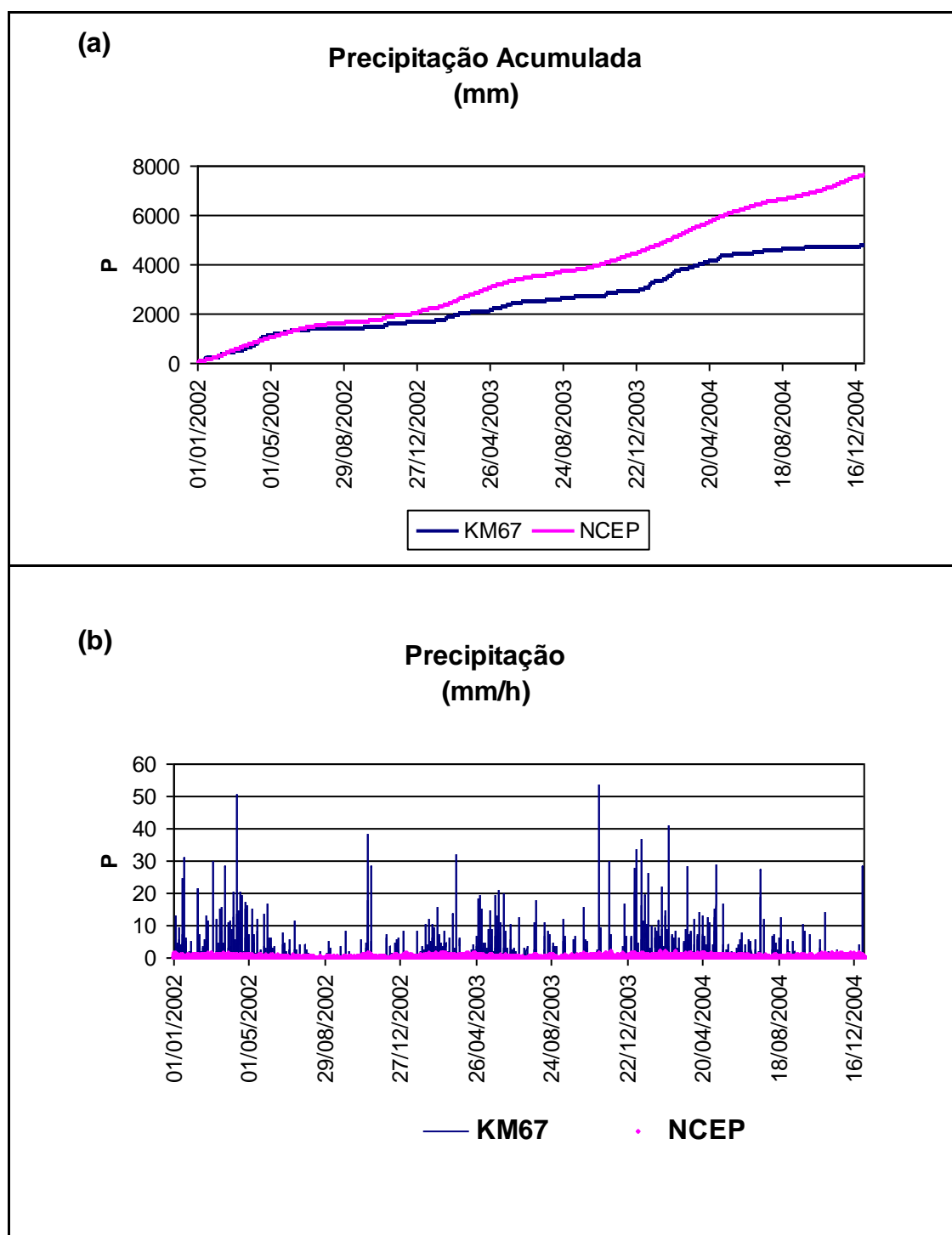


Figura 53. (a) Gráfico cumulativo de P observado e P assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de P observado e P assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o período de 2002 a 2004 no Sítio KM67.

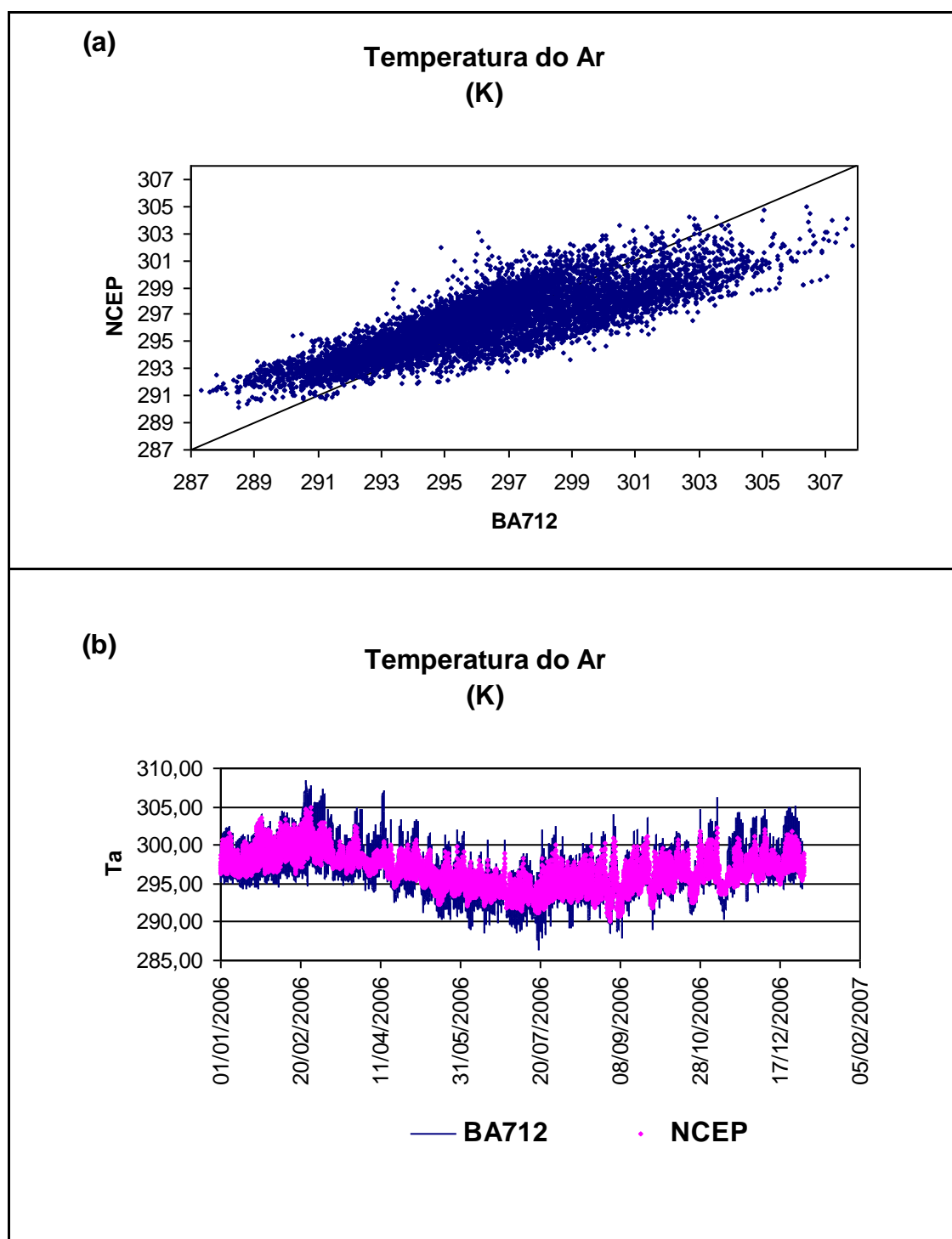


Figura 54. (a) Gráfico da relação entre T_a observado e T_a assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de T_a observado e T_a assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.

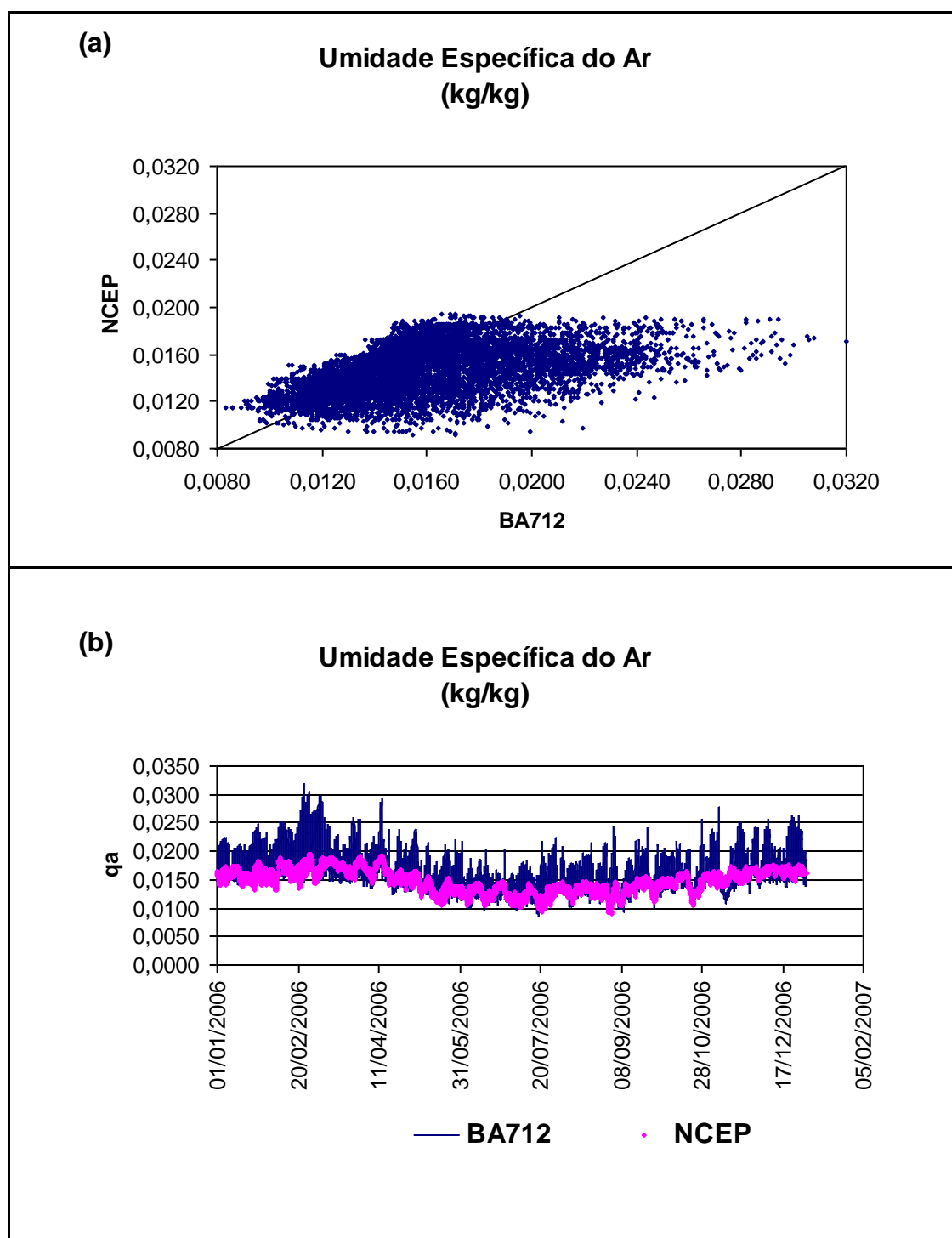


Figura 55. (a) Gráfico da relação entre q_a observado e q_a assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de q_a observado e q_a assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.

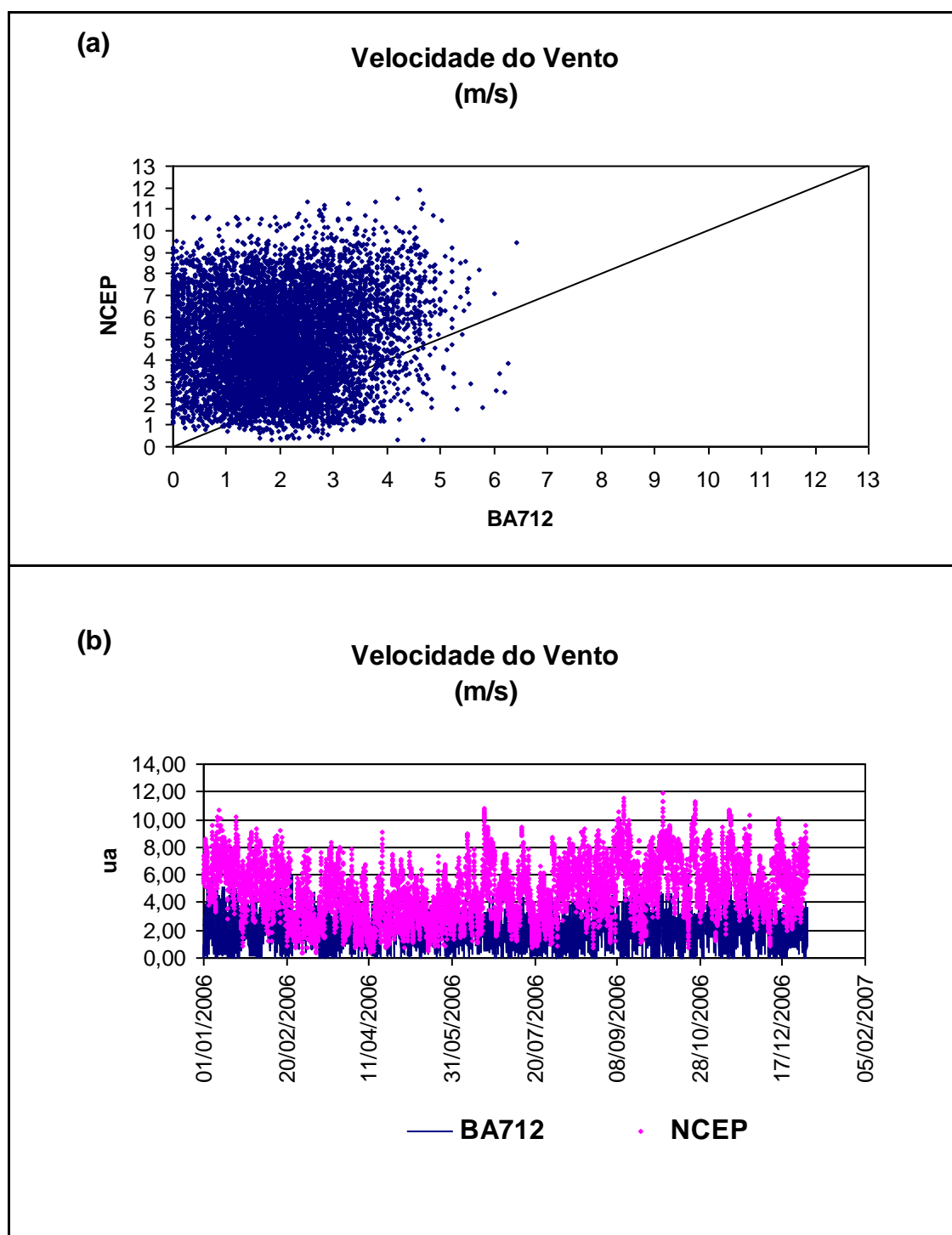


Figura 56. (a) Gráfico da relação entre ua observado e ua assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de ua observado e ua assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.

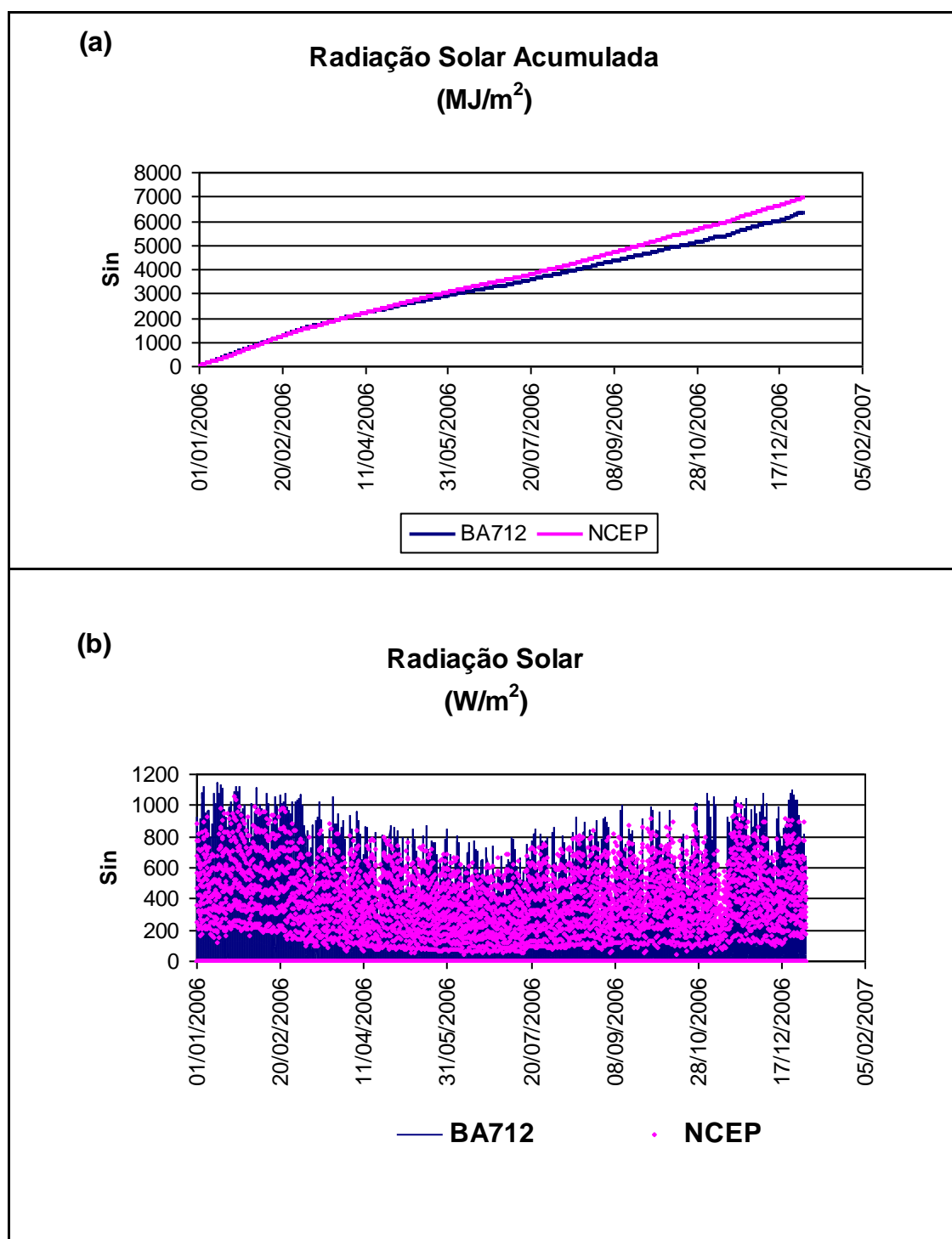


Figura 57. (a) Gráfico cumulativo de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Sin observado e Sin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.

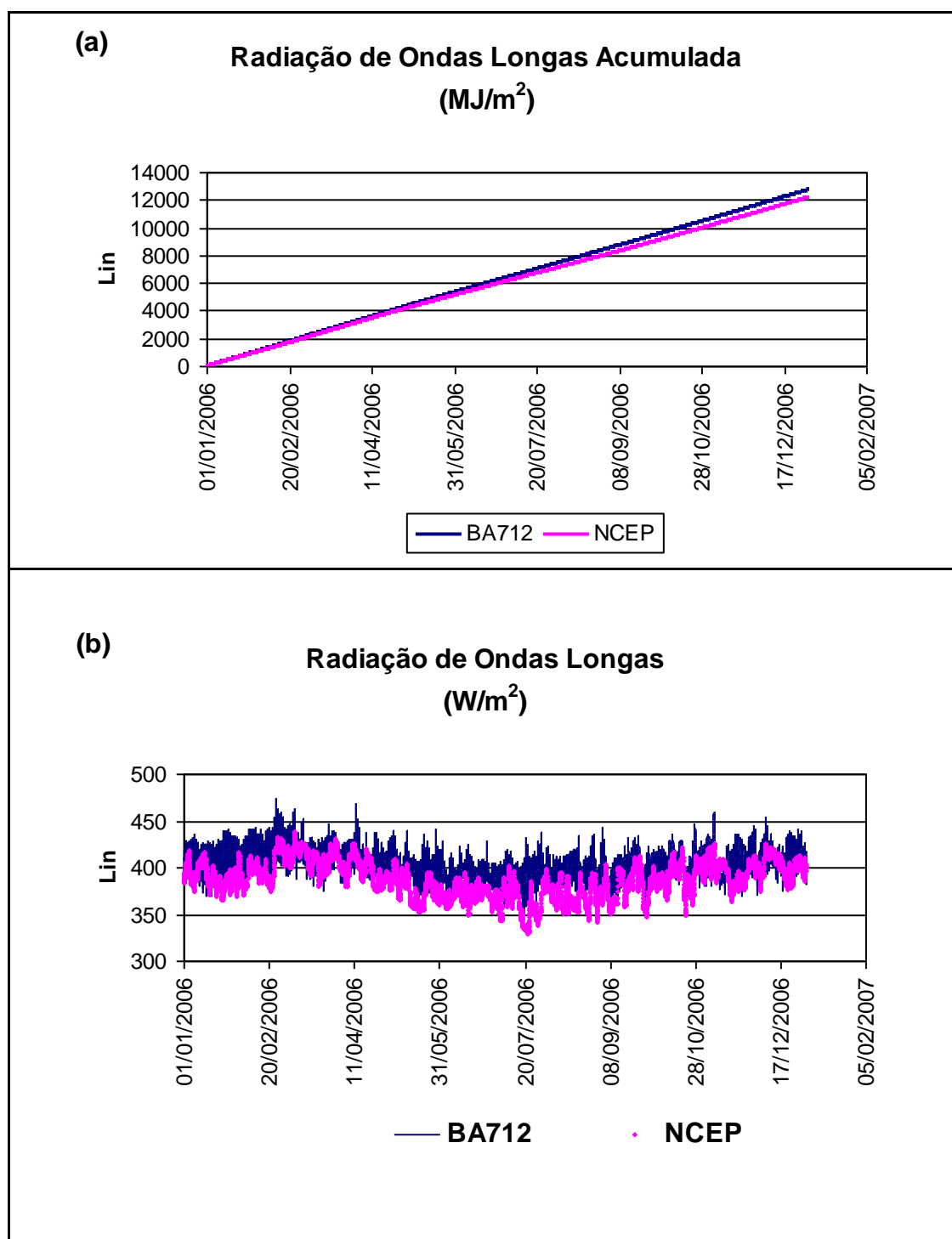


Figura 58. (a) Gráfico cumulativo de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de Lin observado e Lin assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.

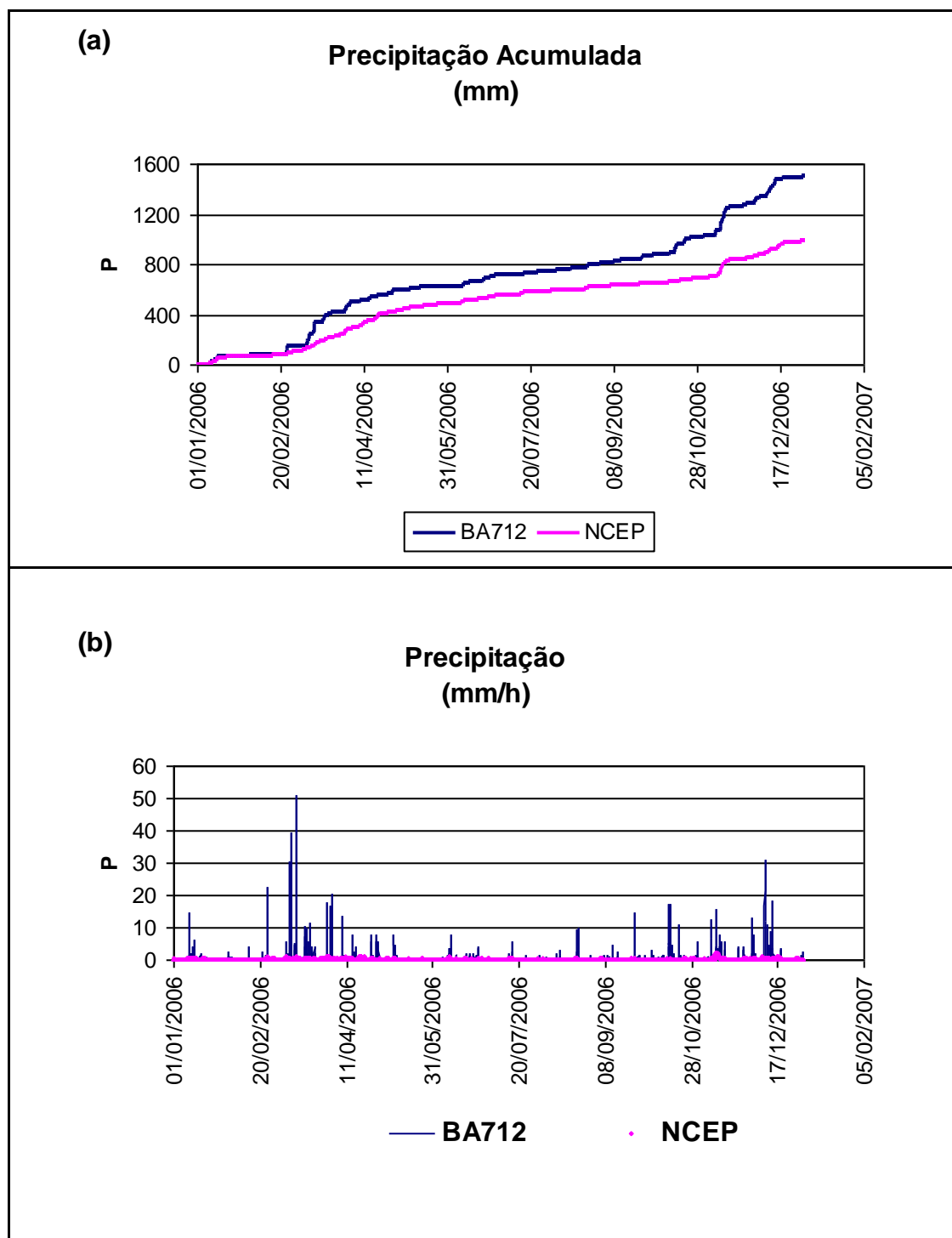


Figura 59. (a) Gráfico cumulativo de P observado e P assimilado do NCEP; (b) gráfico da série temporal de P observado e P assimilado do NCEP; e valores médios, RMSE e erro relativo entre os valores observados e assimilados para o ano de 2006 no Sítio BA712.

Com relação aos valores de Sin assimilados a partir da re-análise do NCEP, verificou-se que esses valores apresentavam uma superestimativa com um erro aproximado de 18% para os dois sítios analisados.

Os dados de P do produto assimilado a partir da re-análise do NCEP não conseguiram descrever as condições de precipitação características dos sítios avaliados, apresentando valores de precipitação subestimados que ocorrem durante todo o período, o suficiente para produzir, ao longo dos períodos analisados, uma precipitação acumulada superestimada com o erro de 61,11% para o sítio KM67 e uma precipitação acumulada subestimada com um erro de 35,29% para o sítio BA712.

Com a simulação do modelo SITE usando os dados meteorológicos assimilados a partir dos dados de re-análise do NCEP para o sítio KM67 foi possível quantificar o erro introduzido nas simulações, quando esses dados foram usados ao invés dos dados coletados localmente, para os resultados dos fluxos de Rn, PARi, H, LE e NEE (Tabela 14), e para os resultados de NPP (Tabela 15) e LAI (Figura 60 e Tabela 17) para os períodos avaliados na calibração do modelo.

Embora os valores médios para os fluxos Rn, PARi, H, LE e NEE não tenham apresentado uma alteração considerável em seus resultados, a simulação do modelo SITE usando os dados assimilados de re-análise do NCEP produziu um ajuste muito menor para os coeficientes de calibração $\rho = 0,36$, $\alpha = 0,22$ e $RMSE = 130,41 \text{ W m}^{-2}$ de LE, que se justifica pelos valores superestimados da precipitação e da radiação solar incidente usados nesta simulação. Com esses dados, os coeficientes de calibração $\rho = 0,83$, $\alpha = 0,74$ e $RMSE = 121,59 \text{ W m}^{-2}$ para Rn, e $\rho = 0,85$, $\alpha = 0,71$ e $RMSE = 265,18 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para PARi apresentaram um ajuste consideravelmente menor em seus coeficientes de calibração, enquanto que $\rho = 0,80$, $\alpha = 0,81$ e $RMSE = 42,79 \text{ W m}^{-2}$ para H e $\rho = 0,79$, $\alpha = 0,64$ e $RMSE = 2,95 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para NEE sofreram pequenas alterações.

Tabela 14. Valores médios, erro relativo, ρ , α e RMSE entre os dados observados e simulados, para a simulação com os dados assimilados da re-análise do NCEP para o Sítio KM67. As unidades referem-se aos valores médios e RMSE, pois ρ e α são adimensionais.

		Rn (W m ⁻²)	PARi (μmol m ⁻² s ⁻¹)	H (W m ⁻²)	LE (W m ⁻²)	NEE (kg C ha ⁻¹ h ⁻¹)
Observado	Médio	136,66	363,36	35,38	126,04	-1,21
Dados de Re-análise do NCEP	Médio	130,44	365,24	37,27	109,58	-1,32
	 Erro (%)	4,55	0,52	5,34	13,06	9,09
	ρ	0,83	0,85	0,80	0,36	0,79
	α	0,74	0,71	0,81	0,22	0,64
	RMSE	121,59	265,18	42,79	130,41	2,95

Tabela 15. NPP observada, NPP Simulada pelo SITE com dados da estação meteorológica e NPP Simulada pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP, e os erros relativos para o Sítio KM67 em 2004.

		NPP Observada	NPP SITE_{Estação}		NPP SITE_{NCEP}	
Sítio	Ano	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	 Erro (%)	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	 Erro (%)
KM67	2004	1,055	1,049	0,57	1,252	18,67

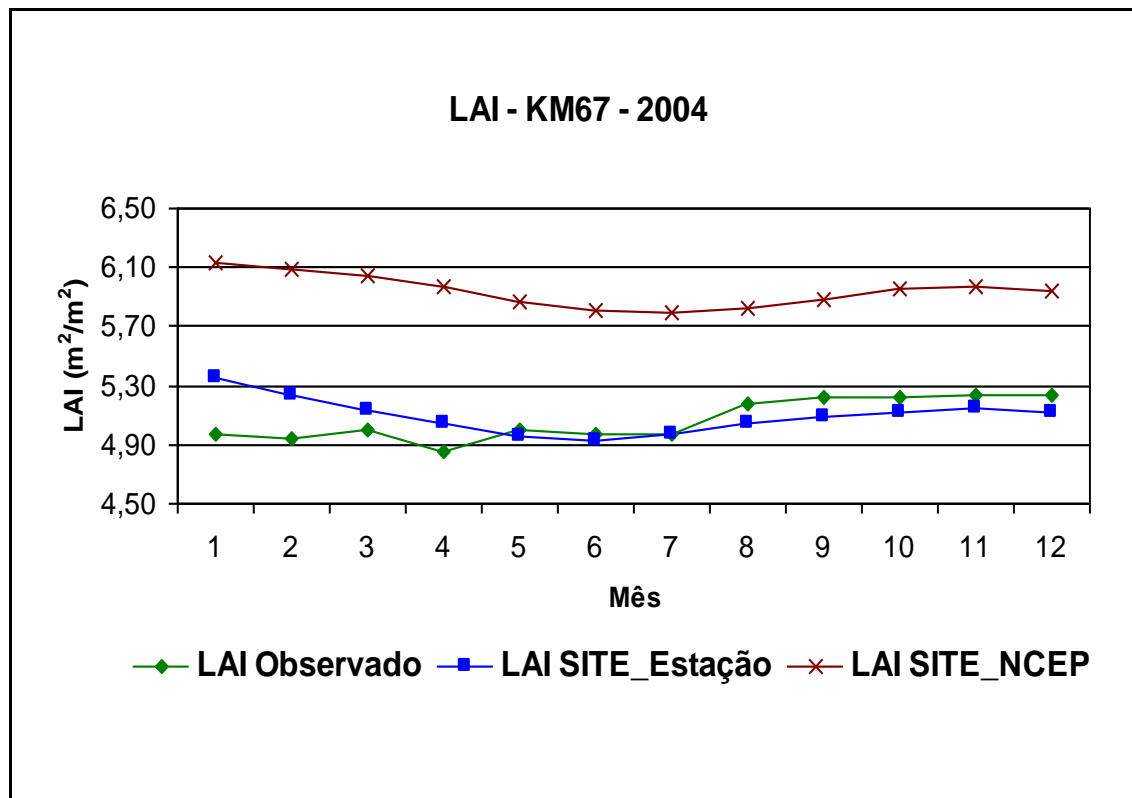


Figura 60. LAI observado, LAI simulado pelo SITE com dados da estação meteorológica e LAI simulado pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP; e seus valores médios anuais, RMSE e erros relativos percentuais para o Sítio KM67 em 2004.

Os valores de NPP e LAI passaram a ser superestimados em 18,67% para a NPP e 17,16% para o LAI com a inclusão dos dados meteorológicos assimilados, valores aproximadamente iguais ao erro introduzido pelos dados assimilados de radiação solar incidente.

3.7. Validação do Algoritmo RATE e Comparação com o MOD17A3

Com a simulação do algoritmo RATE para os sítios KM67, ZF-2, UFAC e BA712 pode-se validar os seus resultados de NPP com os valores observados e compará-los com os resultados do MOD17A3, conforme o apresentado na Tabela 16.

Para os sítios de Floresta Amazônica o algoritmo RATE apresentou resultados de NPP consideravelmente melhores que o produto MOD17A3 com o erro relativo superestimando a NPP em 8,78% no ano de 2001 e 18,96% no ano de 2004 para o sítio KM67, enquanto que para o mesmo sítio a NPP estimada pelo MOD17A3 apresentou uma subestimativa de 21,46% no ano de 2001 e 44,83% no ano de 2004. O sítio ZF-2 apresentou a única exceção para os valores de NPP no ano de 2001, quando o produto MOD17A3 apresentou uma subestimativa de 4,14% contra uma superestimativa de 15,33% para o algoritmo RATE, enquanto que para o ano 2002 nesse sítio o algoritmo RATE apresentou uma subestimativa de 8,78% contra 19,39% de subestimativa para o produto MOD17A3. O sítio UFAC foi o sítio no qual o algoritmo RATE apresentou os melhores resultados para a NPP com uma pequena subestimativa de 2,68% no ano 2001 e 3,39% no ano 2002 contra uma grande subestimativa de 26,43% no ano de 2001 e 32,72% no ano de 2002 para o produto MOD17A3.

Para o sítio de Mata Atlântica os resultados de NPP apresentaram valores semelhantes tanto para o algoritmo RATE quanto para o MOD17A3 com uma pequena subestimativa de 4,47% para o algoritmo RATE e 3,81% para o MOD17A3. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 61.

Tabela 16. Resultados da NPP e os erros relativos para os Sítios KM67, ZF-2, UFAC e BA712.

		NPP Observada	NPP MOD17A3		NPP RATE		NPP SITE_{NCEP}		NPP SITE_{Estação}	
Sítio	Ano	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	<i> Erro </i> (%)	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	<i> Erro </i> (%)	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	<i> Erro </i> (%)	(kg C m ⁻² ano ⁻¹)	<i> Erro </i> (%)
KM67	2001	1,230	0,966	21,46	1,338	8,78				
KM67	2004	1,055	0,582	44,83	1,255	18,96	1,252	18,67	1,049	0,57
ZF-2	2001	1,063	1,019	4,14	1,226	15,33				
ZF-2	2002	1,356	1,093	19,39	1,237	8,78				
UFAC	2001	1,343	0,988	26,43	1,307	2,68				
UFAC	2002	1,299	0,874	32,72	1,255	3,39				
BA712	2006	1,366	1,314	3,81	1,305	4,47	1,355	0,81	1,214	11,13
Média		1,245	0,977	21,53	1,275	2,41	1,303	7,69	1,131	6,53

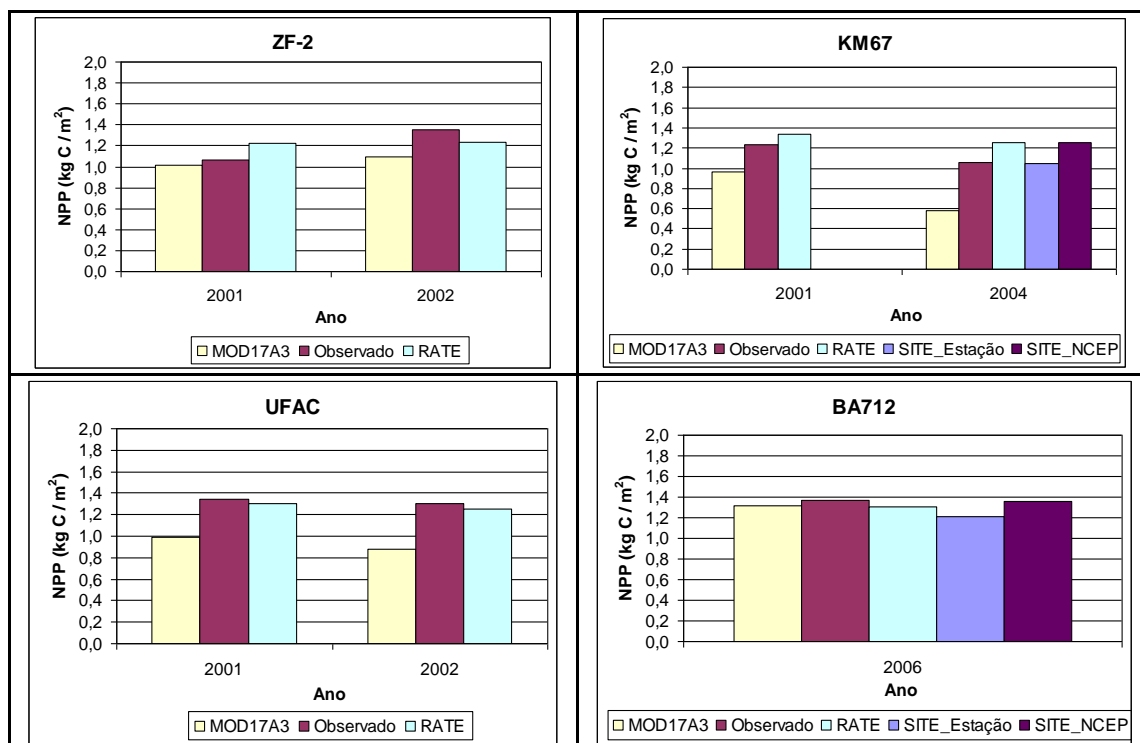


Figura 61. Valores de NPP para os sítios ZF-2, KM67, UFAC e BA712.

Quando são analisados os resultados médios para todos os sítios, o algoritmo RATE apresenta um resultado incomparavelmente melhor que o produto MOD17A3 com um erro relativo de 2,41% contra 21,53% do produto MOD17A3.

Com os resultados de LAI para o sítio KM67 no ano de 2004 foi possível avaliar o comportamento do LAI gerado pelo algoritmo RATE (Figura 62) e quantificar o erro em relação ao observado em campo (Tabela 17). O LAI gerado pelo algoritmo RATE apresentou um erro relativo de 13,81% para o valor médio anual, sendo esse erro menor que o apresentado pela simulação do SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP. A redução no valor do erro relativo para o valor médio anual de LAI gerado pelo algoritmo RATE está associado a um melhor ajuste do perfil médio mensal do LAI introduzido no algoritmo RATE pelo produto de assimilação de LAI.

Foi avaliado, também, o resultado do comportamento da LUE gerado pelo algoritmo RATE (Figura 63) e quantificado o erro em relação ao observado em campo para o sítio KM67 em 2004 (Tabela 18). O LUE gerado pelo algoritmo de NPP do MODIS apresentou uma subestimativa de 24,68% com um perfil médio diário constante, enquanto que o perfil médio diário da LUE observado em campo para o mesmo período apresentou uma amplitude de oscilação de aproximadamente 1,2 g C/MJ com um valor médio anual de $1,54 \pm 0,24$ g C/MJ e uma sazonalidade bem definida ao longo do ano com os maiores valores de LUE ocorrendo para o período de maior incidência de precipitação, isto é, maior cobertura de nuvens e conseqüentemente maior incidência de radiação solar difusa.

Segundo Gower et al. (1999), os valores de LUE mais altos sob condições de cobertura de nuvens surgem porque a radiação é distribuída de forma mais uniforme em cima de todas as folhas na cobertura das árvores, ao invés de saturar apenas algumas folhas quando são iluminadas de forma direta pela radiação solar enquanto que as outras folhas estão do outro lado na parte sombreada das coberturas das árvores.

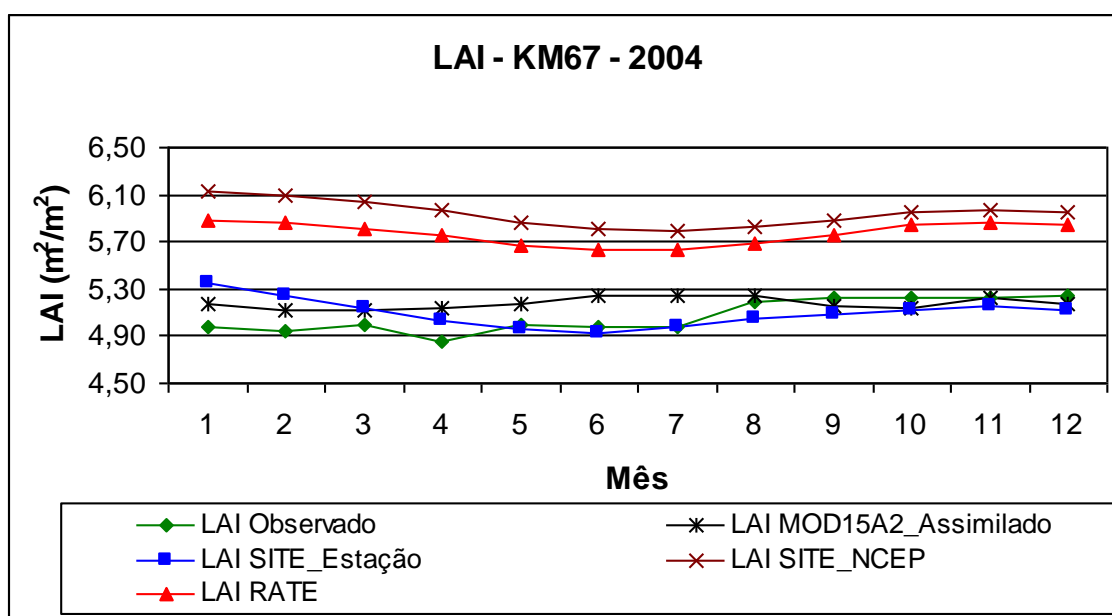


Figura 62. LAI observado, LAI assimilado do MOD15A2, LAI simulado pelo SITE com dados da estação meteorológica, LAI simulado pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e LAI simulado pelo RATE para o Sítio KM67 em 2004.

Tabela 17 – Valores médios com desvio padrão, RMSE e erro relativo entre os dados observados e estimados de LAI pelo produto assimilado do MOD15A2, pelo SITE com dados da estação meteorológica, pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e pelo RATE para o km67 em 2004.

	LAI Observado	LAI MOD15A2 _{Assimilado}	LAI SITE _{Estação}	LAI SITE _{NCEP}	LAI RATE
Média	5,07±0,14	5,18±0,05	5,10±0,12	5,94±0,11	5,77±0,09
RMSE		0,18	0,17	0,89	0,72
 Erro (%)		2,17	0,59	17,16	13,81

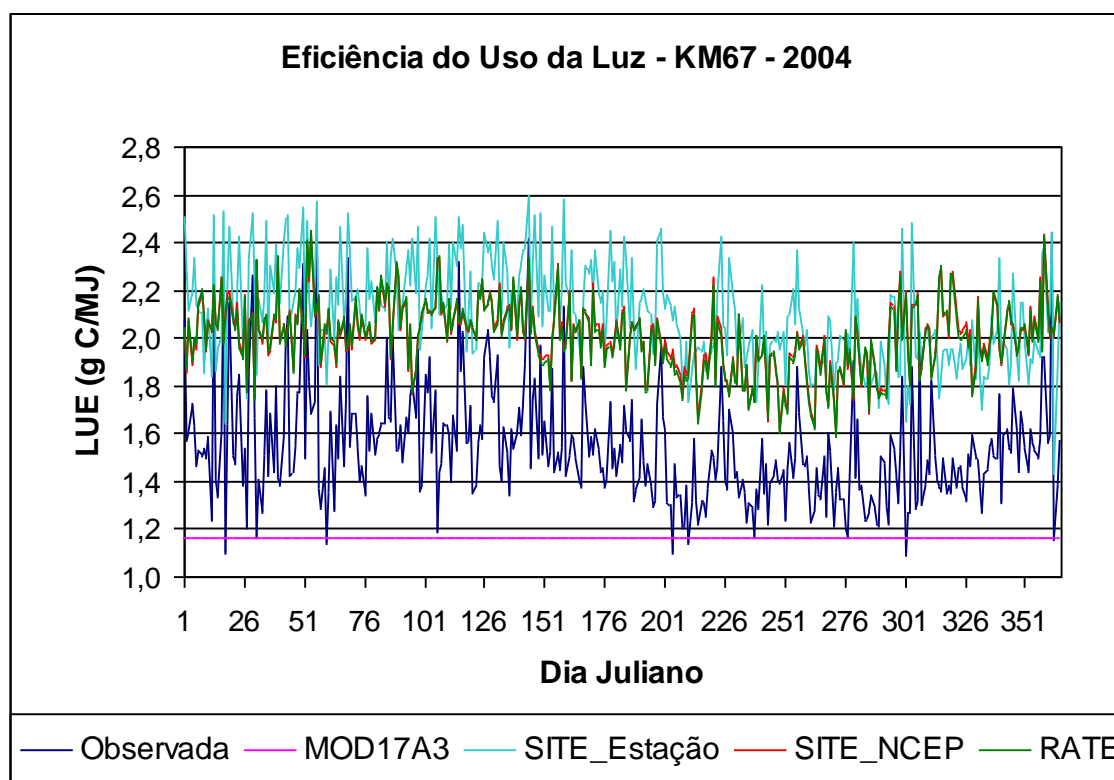


Figura 63. LUE observada, LUE estimada pelo algoritmo de NPP do MODIS (MOD17A3), LUE simulada pelo SITE com dados da estação meteorológica, LUE simulada pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e LUE simulada pelo RATE para o Sítio KM67 em 2004.

Tabela 18 – Valores médios com desvio padrão, RMSE e erro relativo entre os dados observados e estimados de LUE pelo produto MOD17A3, pelo SITE com dados da estação meteorológica, pelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e pelo RATE para o KM67 em 2004.

	LUE_{Observada} (g C/MJ)	LUE_{MOD17A3} (g C/MJ)	LUE_{SITE-Estação} (g C/MJ)	LUE_{SITE-NCEP} (g C/MJ)	LUE_{RATE} (g C/MJ)
Média	1,54±0,24	1,16±0,00	2,10±0,21	2,01±0,15	2,00±0,15
RMSE		0,45	0,58	0,53	0,52
 Erro (%)		24,68	36,36	30,52	29,87

O perfil médio diário da LUE simulado pelo modelo SITE com dados da estação meteorológica, pelo modelo SITE com dados assimilados da re-análise do NCEP e pelo algoritmo RATE descreveram um padrão similar ao apresentado pelo perfil observado em campo, apresentando uma superestimativa comum às três simulações, com um erro relativo para as médias anuais da ordem de 30%. Como estas estimativas apresentam um padrão comum, elas diferem do padrão observado apenas por um fator de ajuste.

3.8. Estudo de Caso

Com a simulação do algoritmo RATE para o período de 26 de fevereiro de 2000 até 31 de dezembro de 2006, pode-se avaliar uma série temporal de NPP gerada pelo algoritmo para a floresta tropical da América do Sul (Figura 64) e para os sítios experimentais onde foram feitas as medidas de NPP (Figuras 65 a 68) e compará-las com a série temporal gerada pelo MOD17A3.

O algoritmo RATE descreveu um perfil para a NPP média do ecossistema de Floresta Tropical da América do Sul com os seus valores oscilando próximos do valor da média observada para todo o período de $1,245 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 16), enquanto que os valores gerados pelo MOD17A3 foram muito inferiores a essa média, apresentando valores acentuadamente subestimados para os anos de 2004 e 2005 (Figura 64) evidenciando uma provável influência dos efeitos da grande seca na Amazônia durante ano de 2005 nos resultados do algoritmo do MODIS (MOD17A3), efeitos que não foram sentidos pela floresta (SALESKA et al., 2007).

SALESKA et al. (2007), em um estudo com dados de índice de vegetação melhorado (EVI) obtidos a partir de dados do sensor MODIS usado para avaliar as variações na fotossíntese da cobertura da floresta Amazônica (XIAO et al., 2005) durante a grande seca de 2005, observaram um significativo incremento na fotossíntese da cobertura da Floresta ($p < 0,0001$) e não um declínio, sugerindo que a Floresta

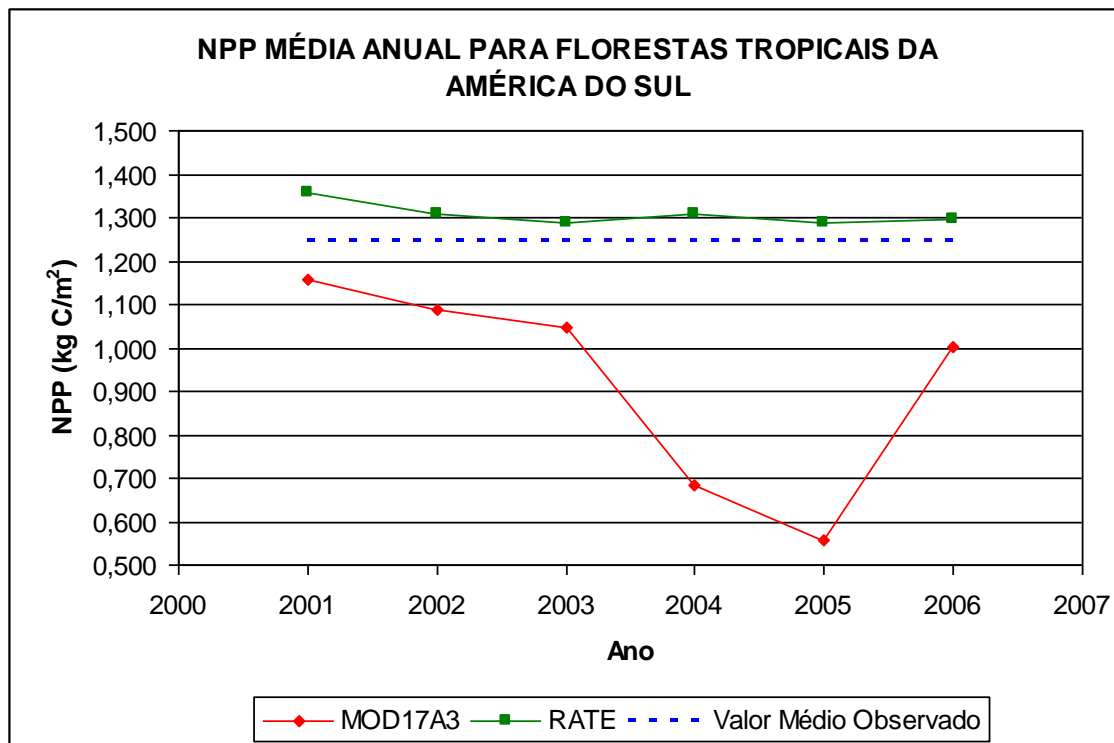


Figura 64. Série temporal de NPP média anual gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para as Florestas tropicais do América do Sul; e o valor médio observado para todo o período.

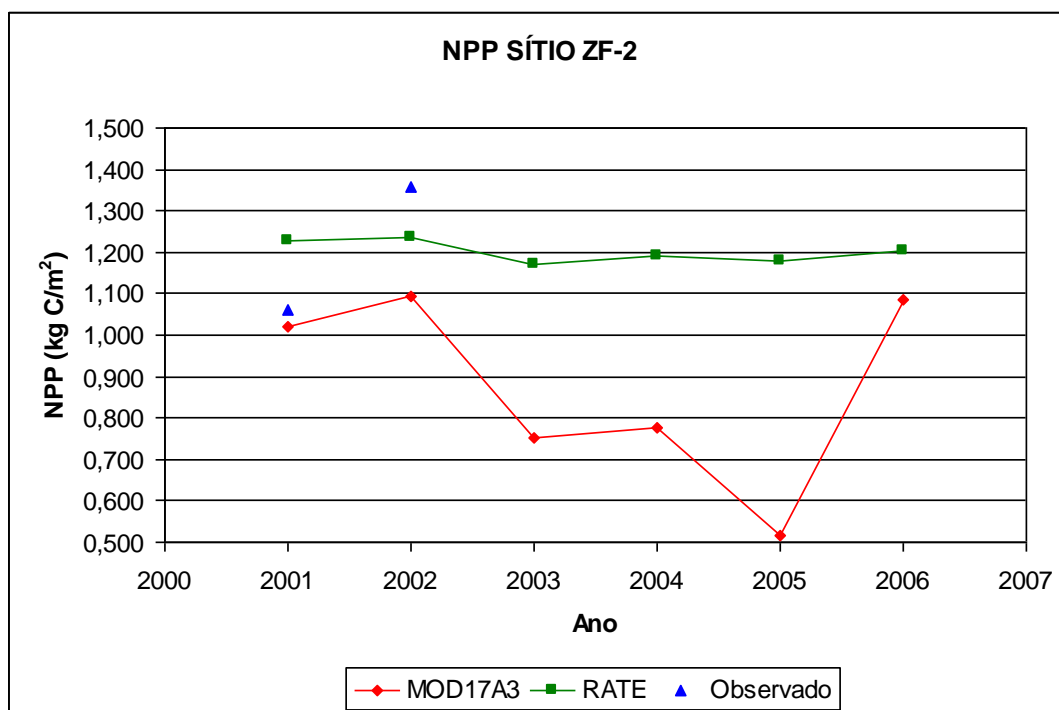


Figura 65. Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio ZF-2, e os valores observados.

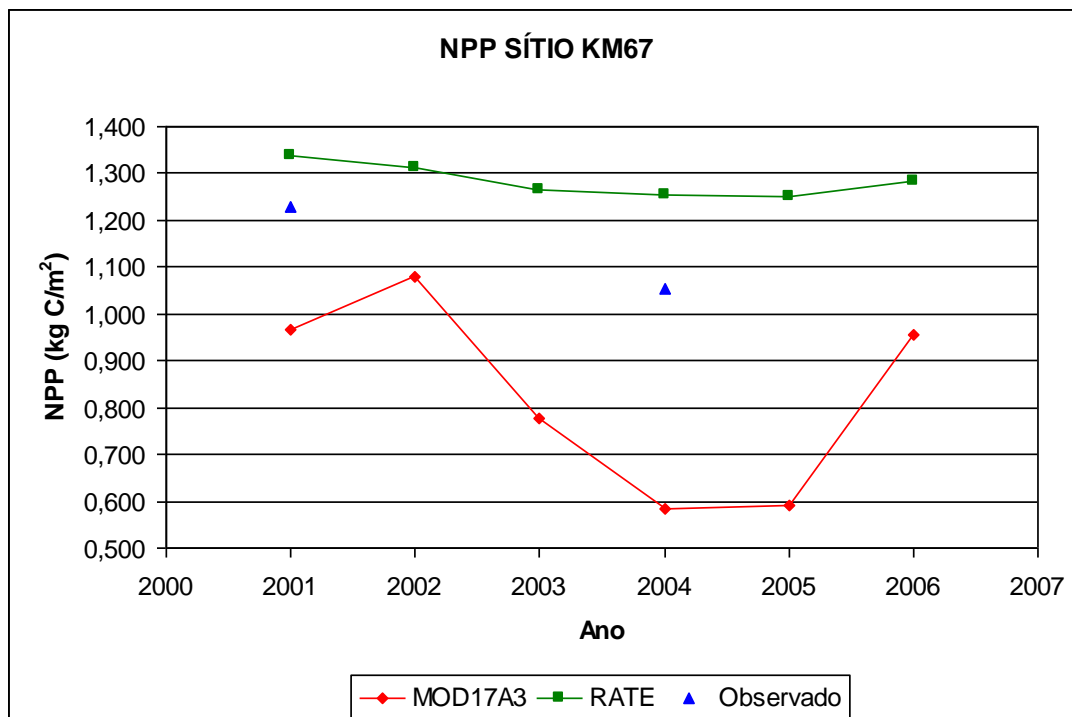


Figura 66. Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio KM67, e os valores observados.

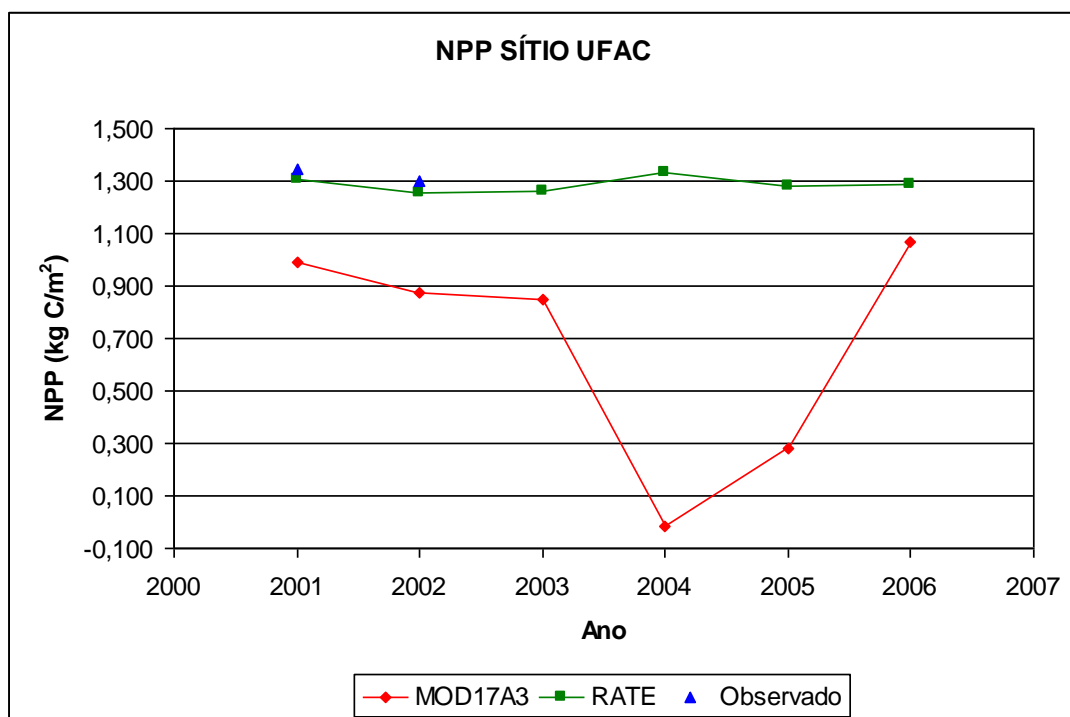


Figura 67. Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio UFAC, e os valores observados.

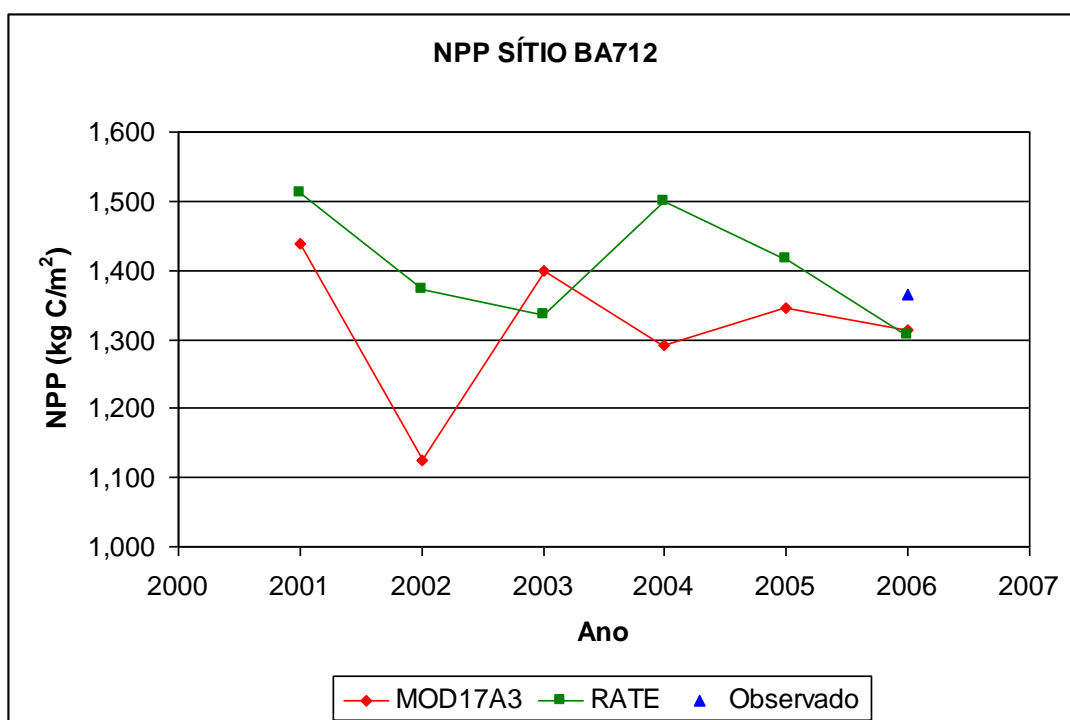


Figura 68. Série temporal de NPP gerada pelo MOD17A3 e pelo algoritmo RATE para o sítio BA712, e os valores observados.

Amazônica possa ser menos vulnerável a anomalias climáticas de curto prazo que muitos modelos de ecossistema assumem.

Para os sítios de Floresta Amazônica ZF-2, KM67 e UFAC (Figuras 65 a 67) as séries temporais gerados pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 apresentaram padrões semelhantes aos da média do ecossistema de Floresta Tropical da América do Sul, com o mesmo padrão de subestimação para a série gerada pelo MOD17A3. Já para o sítio de Mata Atlântica (Figura 68), o algoritmo RATE gerou uma série de NPP com um perfil similar ao gerado pelo MOD17A3 com os valores oscilando entorno do valor médio observado de $1,366 \pm 0,095 \text{ kg C/m}^2$ para o ano de 2006.

As Figuras 69 a 74 apresentam os mapas do resultado final do produto de NPP gerado pelo Algoritmo RATE juntamente com os mapas do produto MOD17A3 para o período de 2001 a 2006, para se visualizar as diferenças apresentadas entre os dois produtos em uma grade de $0,40^\circ$ para a América do Sul.

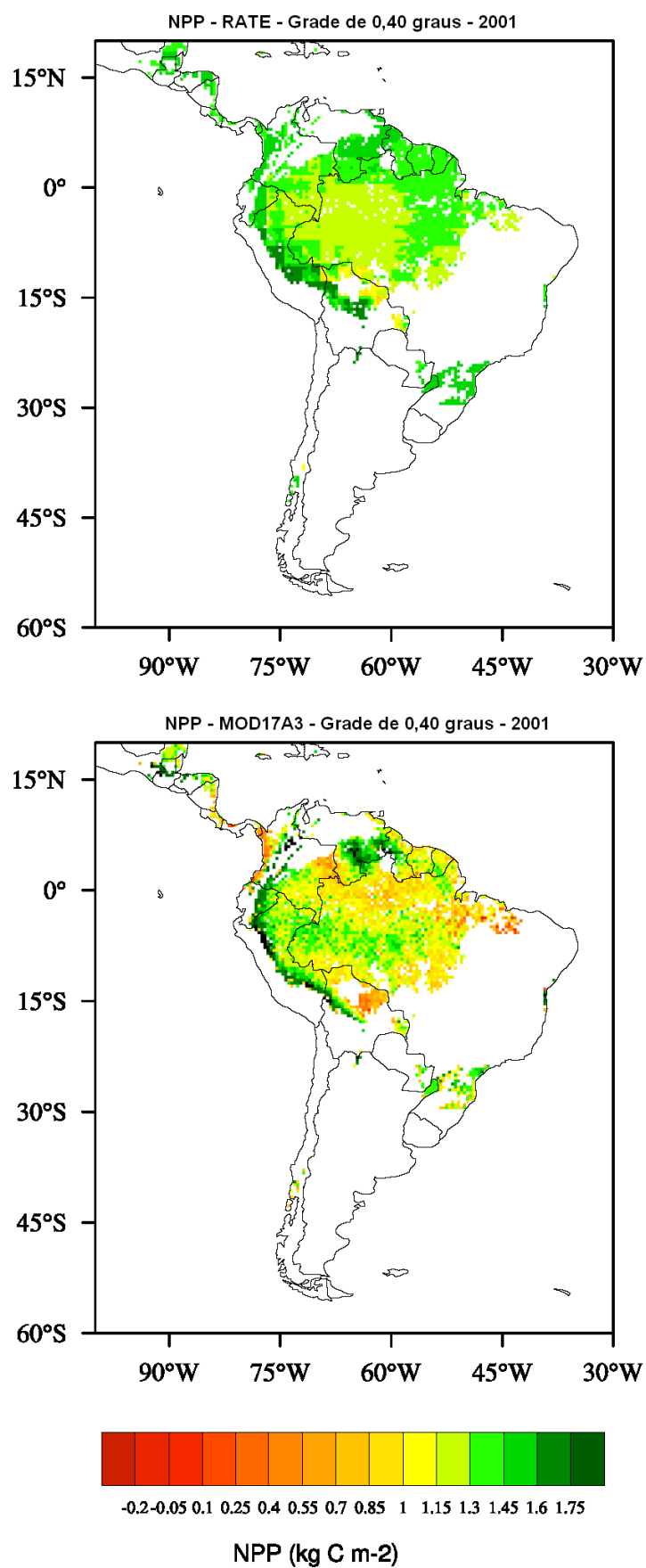


Figura 69. Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2001.

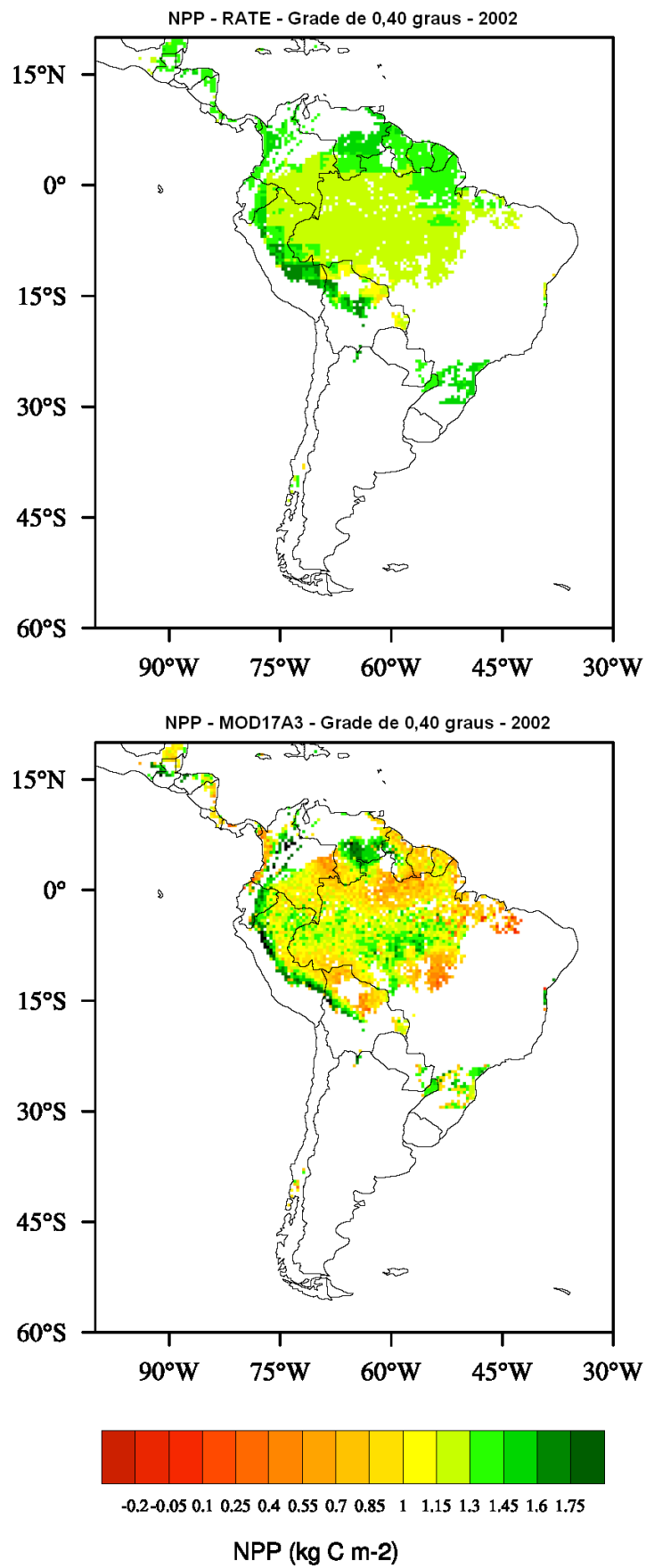


Figura 70. Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2002.

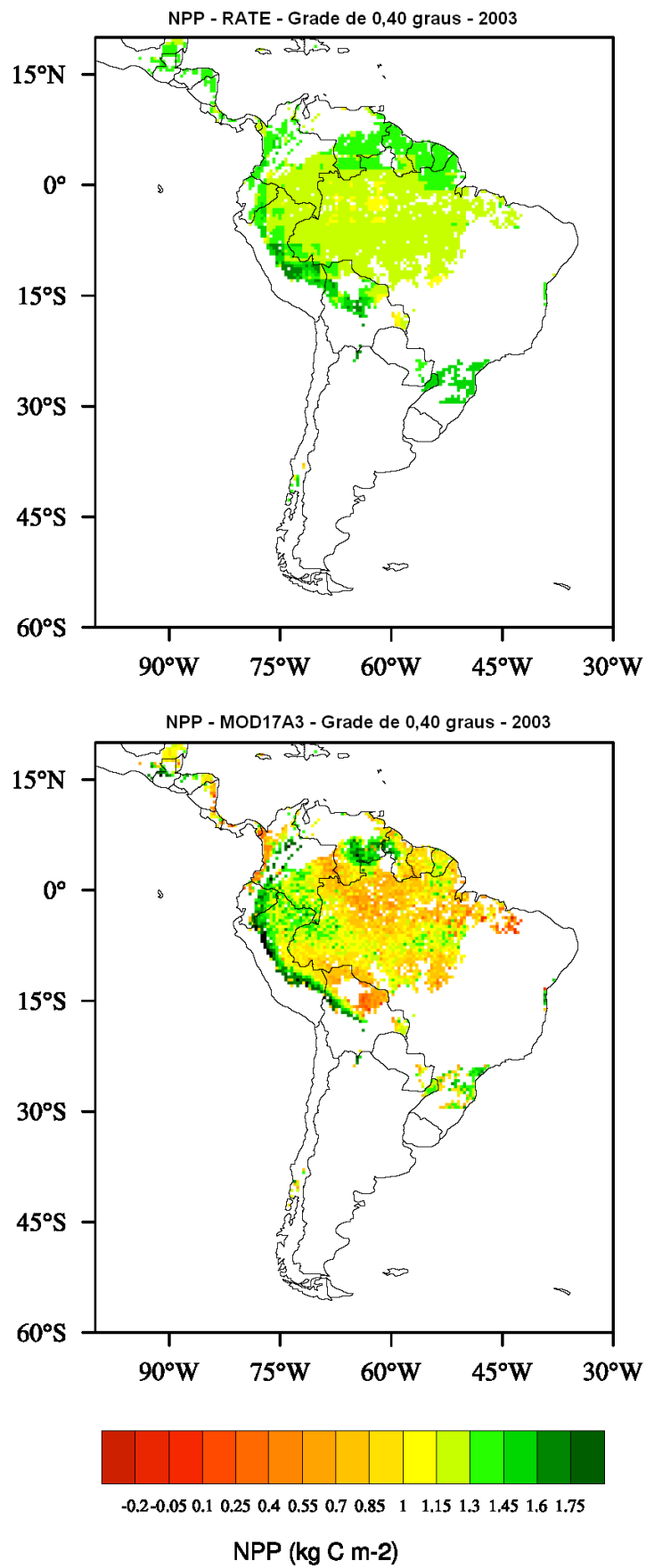


Figura 71. Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2003.

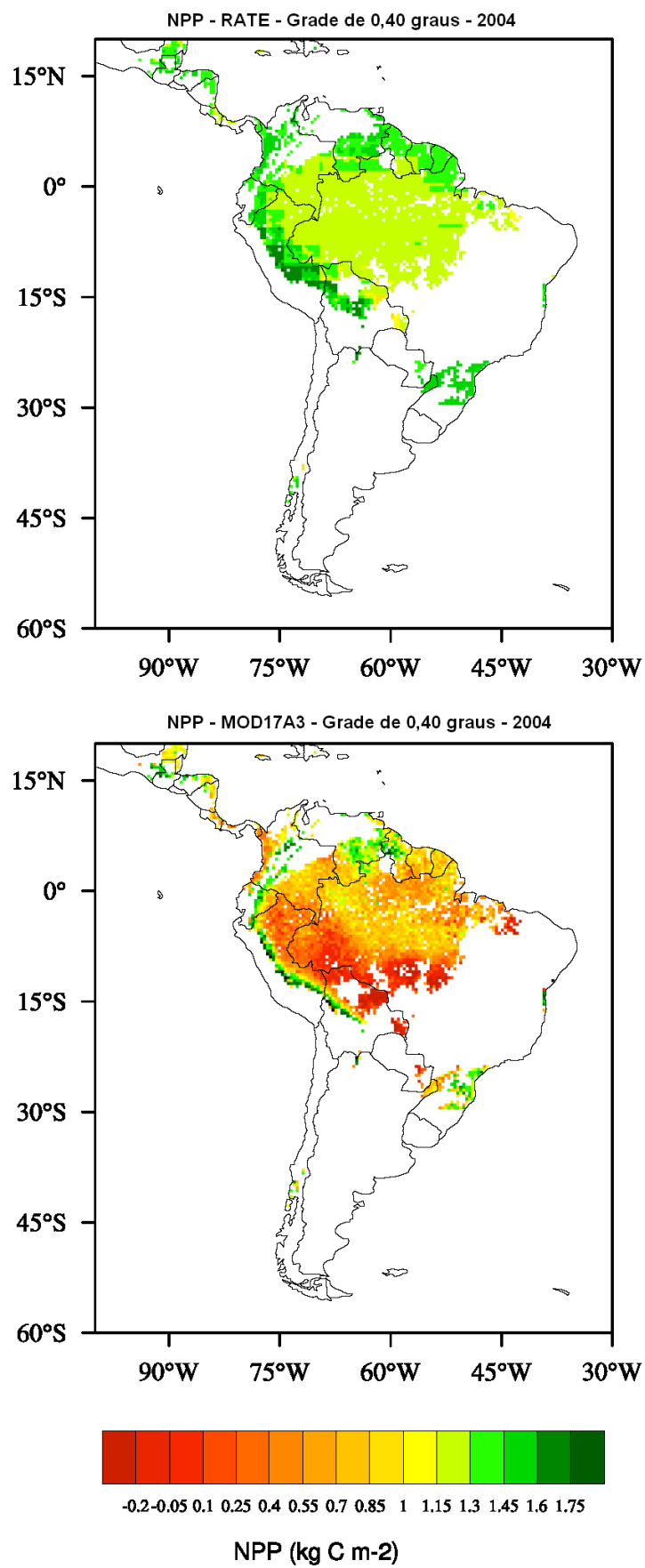


Figura 72. Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2004.

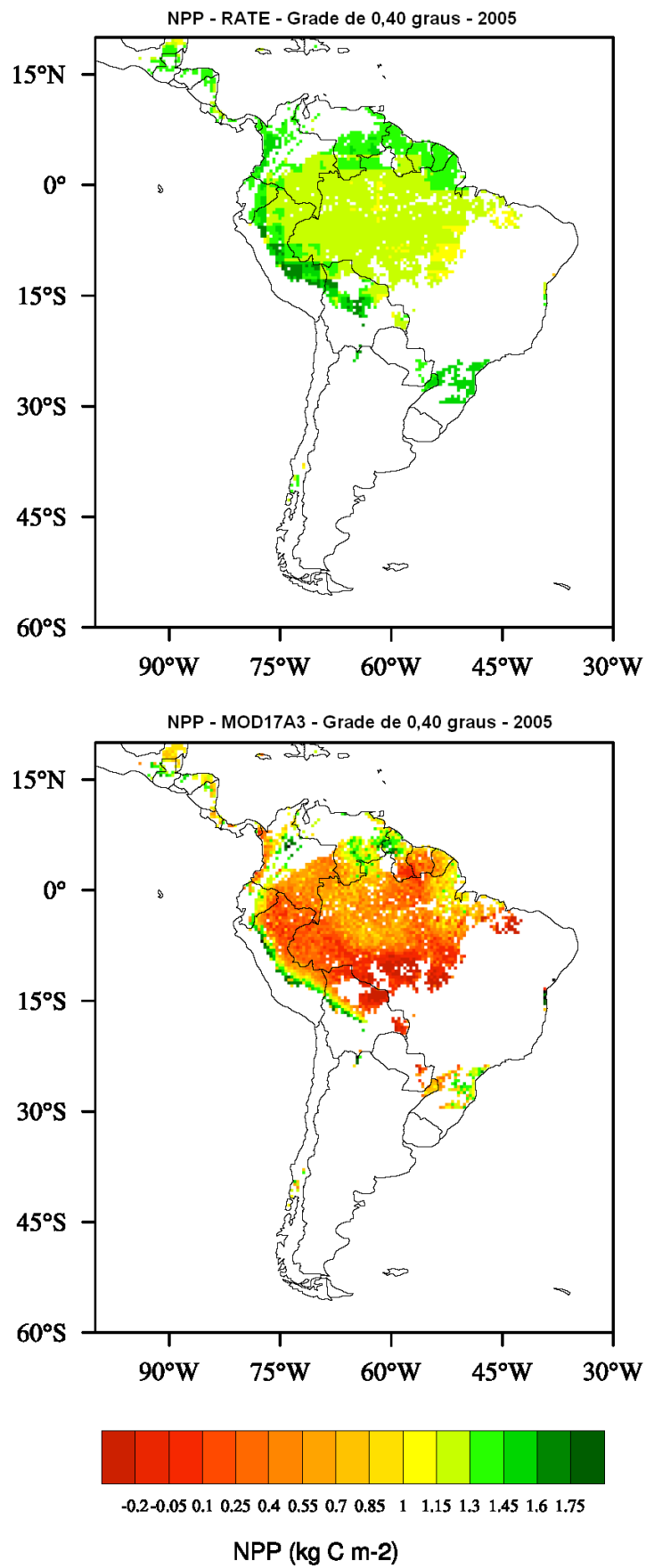


Figura 73. Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2005.

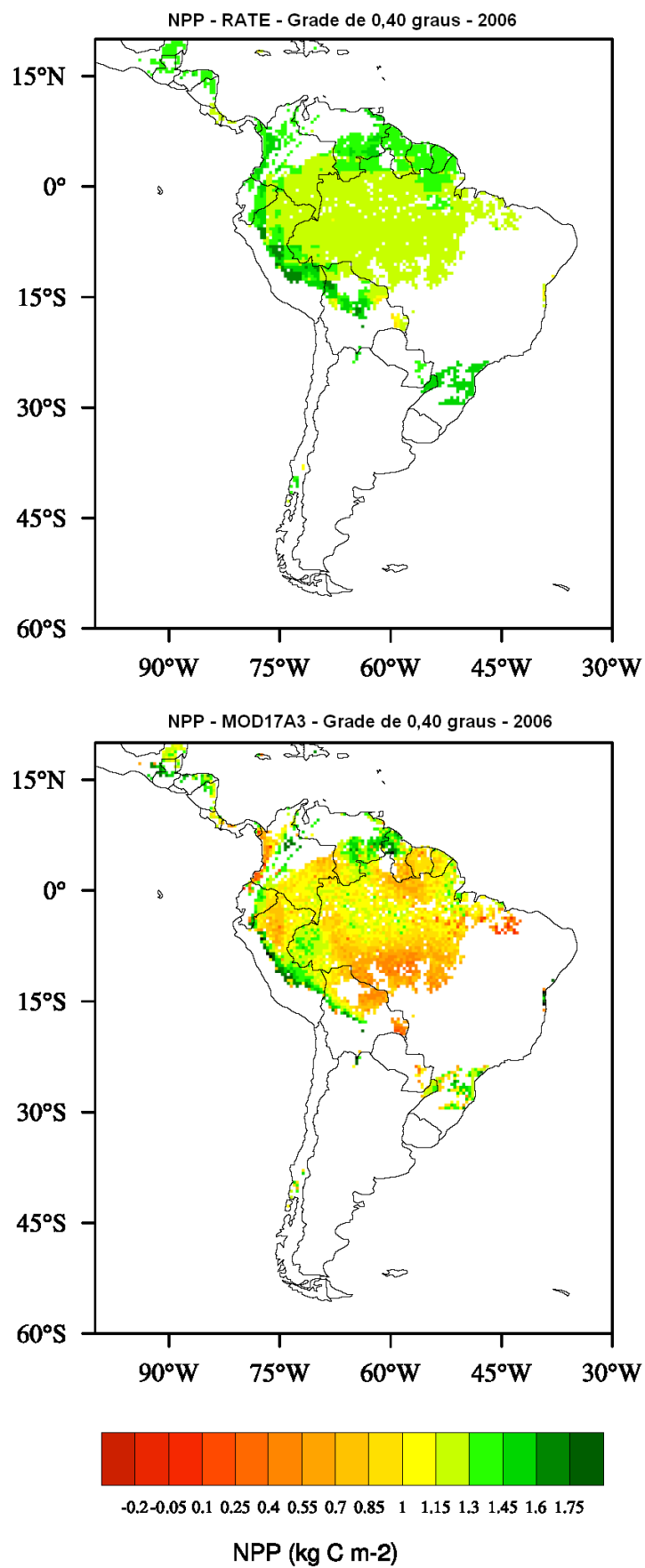


Figura 74. Mapa da NPP gerada pelo algoritmo RATE e pelo MOD17A3 para 2006.

4. CONCLUSÕES

Um algoritmo regional foi desenvolvido para quantificar, de forma automática, a taxa de fixação de carbono (NPP) pelos ecossistemas de Florestas Tropicais da América do Sul. Seu desenvolvimento baseou-se em sensoriamento remoto com dados dos produtos de cobertura do solo, LAI e FAPAR do sensor MODIS (MOD12Q1 e MOD15A2), dados meteorológicos assimilados da re-análise do NCEP/NCAR e no modelo de dinâmica de vegetação SITE. Esse algoritmo, denominado RATE, é capaz de produzir estimativas temporais e espaciais da taxa de fixação de carbono, de 8 em 8 dias, com 0,40 graus de resolução espacial.

O produto de assimilação do LAI e da FAPAR desenvolvido a partir dos dados do MOD15A2 para ser utilizado no algoritmo RATE, apresentou resultados adequados para os valores de LAI e FAPAR quando comparados com valores observados, gerando um banco de dados para a Floresta Amazônica superior ao produto original MOD15A2. Embora esse produto de assimilação do LAI e da FAPAR, com uma resolução temporal de 8 dias, possa ainda ser melhor ajustado à medida que novos valores de LAI e FAPAR observados em campo sejam obtidos para um maior número de sítios experimentais.

Quanto ao produto de assimilação de dados meteorológicos gerados a partir dos dados de re-análise do NCEP/NCAR, utilizados na inicialização do algoritmo RATE, pode-se verificar a clara necessidade da utilização de um banco de dados meteorológicos que melhor represente os valores de Radiação Solar e Precipitação para a América do Sul, dados essenciais para a estimativa de NPP.

Para os sítios na Floresta Amazônica, o Algoritmo RATE apresentou valores de NPP próximos aos valores observados, com taxas de fixação de carbono superiores às estimadas pelo produto de NPP do MOD17A3. Os resultados do MOD17A3 apresentaram, de modo geral, uma subestimativa em seus valores, com uma evidente anomalia para os anos de 2004 e 2005.

Para o sítio de Mata Atlântica, o Algoritmo RATE apresentou valores de NPP próximos aos estimados pelo MOD17A3. Ambos os produtos apresentaram uma pequena subestimativa nos valores estimados em relação ao valor observado em campo entorno de 4%.

Concluindo, o Algoritmo RATE demonstrou ser confiável para a estimativa da taxa de fixação de carbono pelas Florestas Tropicais para as condições específicas da América do Sul, com um erro médio de 2,41%.

Finalmente, é possível identificar uma série de trabalhos complementares para realização futura:

- (a) A aquisição de dados de LAI, FAPAR e NPP para um maior número de sítios de Floresta Tropical georreferenciados representativos da América do Sul ou implementação desses sítios para acompanhamento futuro.
- (b) A implementação de um banco de dados meteorológicos que melhor represente as condições específicas da América do Sul, principalmente para os dados de radiação solar incidente e precipitação.

- (c) A implementação do algoritmo RATE de forma operacional, com funcionamento automático, e disponibilização do produto online na internet.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELWARD, A. The IGBP-DIS Global 1-km Land Cover Data Set DISCover. IGBP-DIS Working Paper, ed., 1996.
- BROWN, S.; IVERSON, L. R. Biomass estimates for tropical forests. *World Resources Review*, 4, 366-384, 1992.
- BROWN, I.F.; MARTINELLI, L.A.; WAYT THOMAS, W.; MOREIRA, M.Z.; CID FERREIRA, C.A.; VICTORIA, R.L. Uncertainty in the biomass of Amazonian forest: an exemple from Rondônia, Brasil. *Forest Ecology and Management*, 75, 175-189, 1995.
- 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.
- CHAMBERS, J. Q.; SANTOS, J. D.; RIBEIRO, R. J.; HIGUCHI, N. Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 152, 73-84, 2001.
- CLARK, D. A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J. Q.; THOMLINSON, J. R.; NI, J.; HOLLAND, E. A. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 11, 371-384, 2001.
- COHEN, W. B.; MAIERSPERGER, T. K.; TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; PFLUGMACHER, D.; KENNEDY, R. E.; KIRSCHBAUM, A.; RUNNING, S. W.; COSTA, M. H.; GOWER, S.T. MODIS land cover and LAI collection 4 product quality across nine sites in the western hemisphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 7, 2006.
- FIELD, C. B.; RANDERSON, J. R.; MALMSTRÖM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of the Environment*, 51, 74-88, 1995.

- GOWER, S. T.; KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fapar, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, 70, 29-51, 1999.
- IMBUZEIRO, H. M. A. Calibração do modelo Ibis na Floresta Amazônica usando múltiplos sítios. Dissertação de mestrado em Meteorologia Agrícola. 67p., Viçosa, 2005.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAN, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JANOWIAK, J.; JANNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, p. 437- 471, 1996.
- 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.
- 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.
- MYNENI, R. B.; NEMANI, R.; RUNNING, S. W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 1380-1393, 1997.
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766, 1972.
- NEMANI, R.; RUNNING, S. W. Implementing a hierarchical global vegetation classification in ecosystem function models. *Journal of Vegetation Science*, 7, 337-346, 1996.
- PINTO, L. I. C. Comparação de Produtos de Precipitação e Radiação Solar Incidente Para a América Do Sul: Dados Observados e Re-análises. Dissertação de mestrado em Meteorologia Agrícola. 75p., Viçosa, 2007.
- RUNNING, S. W.; LOVELAND, T. R.; PIERCE, L. L.; HUNT, E. R. A remote sensing based vegetation classification for global land cover analysis. *Ambio*, 23, 77-81, 1994.
- RUNNING, S. W.; LOVELAND, T. R.; PIERCE, L. L.; NEMANI, R.; HUNT, E. R. Jr. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. *Remote Sensing of Environment*, 51, 39-48, 1995.
- RUNNING, S. W.; BALDOCCHI, D. D.; TURNER, D. P.; GOWER, S. T.; BAKWIN, P. S.; HIBBARD, K. A. A Global Terrestrial Monitoring Network Integrating Tower Fluxes, Flask Sampling, Ecosystem Modeling and EOS Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 70, 108-127, 1999.

- RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *BioScience*, v. 54, n. 6, 547-560, 2004.
- SALESKA, S. R.; MILLER, S. D.; MATROSS, D. M.; GOULDEN, M. L.; WOFSY, S. C.; ROCHA, H. R.; CAMARGO, P. B.; CRILL, P.; DAUBE, B. C.; FREITAS, H. C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, 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.
- SALESKA, S.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; DA ROCHA, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science*, v. 318, p. 612, 2007.
- SANTOS, S. N. M.; COSTA, M. H. A simple tropical ecosystem model of carbon, water and energy fluxes. *Ecological Modelling*, 176, 29-312, 2004.
- SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 1: Model formulation. *Journal of Climate*, 9, 676-705, 1996.
- SELLERS, P. J.; DICKINSON, R. E.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; DENNING, A. S.; MOONEY, H. A.; NOBRE, C. A.; SATO, N.; FIELD, C. B.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchange of energy, water, and carbon between continents and atmosphere. *Science*, 275, 602-509, 1997.
- 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. Dissertação de mestrado em Meteorologia Agrícola. 38p., Viçosa, 2004.
- SENNA, M. C. A.; COSTA, M. H.; SHIMABUKURO, Y. E. Fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Amazon tropical forest: A comparison of field measurements, modeling and remote sensing. *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, G01008, doi:10.1029/2004JG000005, 2005.
- SPOLADOR, J.; SANCHES, L.; COSTA, M. H. Radiação fotossinteticamente ativa em uma floresta de transição Cerrado-Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, 301-307, 2006.
- TIEPOLO, G.; CALMON, M.; FERETTI, A. R. Measuring and monitoring carbon stocks at the Guaraqueçaba Climate Action Project, Parana, Brazil. Taiwan Forestry Research Institute Winrock International. Proceedings of the International Symposium on Forest Carbon Sequestration and Monitoring, 11-15 November, Extension Serie N° 153, 98-115, Taipei, Taiwan, 2002.
- TURNER, D. P.; URBANSKI, S.; BREMER, D.; WOFSY, S. C.; MEYERS, T.; GOWER, S. T.; GREGORY, M. A cross-biome comparison of daily light-use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*, 9, 383-395, 2003.
- TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; COHEN, W. B.; GOWER, S. T.; RUNNING, S. W.; ZHAO, M.; COSTA, M. H.; KIRSCHBAUM, A. A.; HAM, J. M.; SALESKA, S. R.; AHL, D. E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102, 282-292, 2006.

- 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.
- VIEIRA, S.; DE CAMARGO, P. B.; SELHORST, D.; DA SILVA, R.; HUTYRA, L.; CHAMBERS, J. Q.; BROWN, I. F.; HIGUCHI, N.; DOS SANTOS, J.; WOFSY, S. C.; TRUMBORE, S. E.; MARTINELLI, L. A. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. *Ecosystem Ecology*, 140, 468-479, 2004.
- XIAO, X.; ZHANG, Q.; SALESKA, S.; HUTYRA, L.; DE CAMARGO, P.; WOFSY, S.; FROLKING, S.; BOLES, S.; KELLER, M.; MOORE III, B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 94, 105-122, 2005.
- ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 95, 164-176, 2005.