

MÔNICA CARNEIRO ALVES SENNA

**FRAÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA
ABSORVIDA PELA FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA: UMA
COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS BASEADAS EM
MODELAGEM, SENSORIAMENTO REMOTO E MEDIÇÕES DE
CAMPO**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2004**

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

T

S478f
2004

Senna, Mônica Carneiro Alves, 1981-

Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela Floresta Tropical Amazônica: uma comparação entre estimativas baseadas em modelagem, sensoriamento remoto e medições de campo / Mônica Carneiro Alves Senna. – Viçosa : UFV, 2004.
xv, 38f. : il. ; 29cm.

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

Referências bibliográficas: f. 36-38

1. Radiação solar - Amazônia. 2. Meteorologia agrícola. 3. Sensoriamento remoto. 4. Ecossistema - Simulação por computador. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

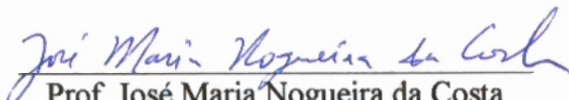
CDD 20.ed. 551.5271


MÔNICA CARNEIRO ALVES SENNA

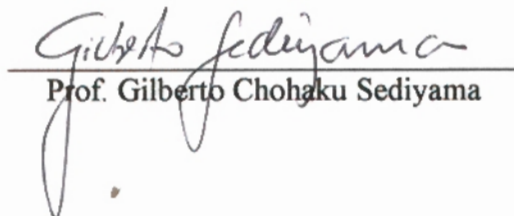
**FRAÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA
ABSORVIDA PELA FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA: UMA
COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS BASEADAS EM
MODELAGEM, SENSORIAMENTO REMOTO E MEDIÇÕES DE
CAMPO**

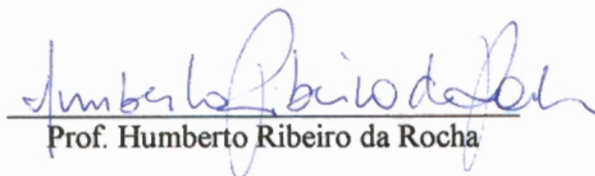
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para a obtenção do título de “Magister Scientiae”.


APROVADA: 12 de fevereiro de 2004


Prof. José Maria Nogueira da Costa
(Conselheiro)


Prof. Yosio Edemir Shimabukuro
(Conselheiro)


Prof. Gilberto Chohaku Sedyama


Prof. Humberto Ribeiro da Rocha


Prof. Marcos Heil Costa
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e força dada em todos os momentos da minha vida.

Ao meu marido, Thomaz Schröder Senna, pelo amor, companheirismo e paciência.

Aos meus pais, pela educação, sustento e confiança nos meus estudos.

Ao meu orientador, Professor Marcos Heil Costa, e aos co-orientadores, por toda sabedoria, incentivos e valiosas sugestões dadas no decorrer deste trabalho.

A todos os demais professores, colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pelo apoio e amizade.

BIOGRAFIA

MÔNICA CARNEIRO ALVES SENNA, filha de Esperidião Alves Xavier Filho e Jacel Carneiro de Figueiredo Alves, nasceu em 08 de abril de 1981, na cidade de Cruzeiro do Sul – AC.

Em dezembro de 1997 concluiu o curso técnico em Meteorologia pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ).

De janeiro de 2000 a novembro de 2001 trabalhou como Técnica em Meteorologia na Fundação Instituto Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GEO-RIO).

Em março de 2002 concluiu o curso de graduação em Meteorologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Em abril de 2002 iniciou o curso de pós-graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), dedicando-se ao estudo de Micrometeorologia de Ecossistemas.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA.....	5
2.1. Medições de Campo.....	5
2.2. Modelagem.....	8
2.3. Sensoriamento Remoto.....	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
3.1. Medições de Campo.....	13
3.2. Modelagem.....	23
3.3. Sensoriamento Remoto.....	27
3.4. Comparações Entre Estimativas da FAPAR Baseadas em Medições de Campo, Modelagem e Sensoriamento Remoto.....	31
4. CONCLUSÕES.....	34
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{ldif}	Fração da radiação fotossinteticamente ativa difusa absorvida pelo dossel inferior
a_{ldir}	Fração da radiação fotossinteticamente ativa direta absorvida pelo dossel inferior
APAR	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
$APAR_{folhas}$	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelas folhas
$APAR_{galhos}$	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelos galhos
$APAR_t$	Radiação fotossinteticamente ativa total absorvida
$APAR_{topo-0m}$	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida entre o topo do dossel e a superfície do solo
a_{udif}	Fração da radiação fotossinteticamente ativa difusa absorvida pelo dossel superior
a_{udir}	Fração da radiação fotossinteticamente ativa direta absorvida pelo dossel superior
f	Falha na série de dados
FAPAR	Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida
$FAPAR_{topo-0m}$	Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida entre o topo do dossel e a superfície do solo
$FAPAR_{topo-15m}$	Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida entre o topo do dossel e 15 m

f_{dif}	Fração da radiação solar incidente difusa
f_{vis}	Fração da energia da radiação solar incidente na banda do visível
G	Fluxo de calor no solo
IQ	Índice de qualidade total
LAI	Índice de área foliar
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
PAR_{15m}	Radiação fotossinteticamente ativa incidente em 15 m do dossel
PAR_{in}	Radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo do dossel
PAR_{ldif}	Radiação fotossinteticamente ativa difusa incidente no dossel inferior
PAR_{ldir}	Radiação fotossinteticamente ativa direta incidente no dossel inferior
PAR_{out}	Radiação fotossinteticamente ativa refletida pelo topo do dossel
$PAR_{out-solo}$	Radiação fotossinteticamente ativa refletida pela superfície do solo
PAR_{udif}	Radiação fotossinteticamente ativa difusa incidente no dossel superior
PAR_{udir}	Radiação fotossinteticamente ativa direta incidente no dossel superior
QA	Controle de qualidade (<i>Quality Assessment</i>)
Q_{topo}	Radiação solar incidente no topo do dossel medida na torre
r	Refletância da radiação fotossinteticamente ativa
SAI	Índice de área dos galhos
$t_{topo-0m}$	Transmitância da radiação fotossinteticamente ativa entre o topo do dossel e a superfície do solo
$t_{topo-15m}$	Transmitância da radiação fotossinteticamente ativa entre o topo do dossel e 15 m
X_i	Valor da série de dados a ser preenchido
X_p	Antecessor da falha da série de dados
X_{p+f+1}	Sucessor da falha da série de dados

LISTA DE ABREVIATURAS

CLM	<i>Common Land Model</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBIS	<i>Integrated Biosphere Simulator</i>
LBA	Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia
MOD09	Produto de refletância da superfície do MODIS
MOD12	Produto de cobertura do solo do MODIS
MOD15A1	Produto FAPAR / LAI diário do MODIS
MOD15A2	Produto FAPAR / LAI composto num período de 8 dias do MODIS
MOD15_BU	Produto FAPAR / LAI composto num período de um mês do MODIS
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias mensais da $t_{\text{topo-15m}}$, r e $\text{FAPAR}_{\text{topo-15m}}$	19
Tabela 2. Médias mensais da $t_{\text{topo-0m}}$, r e $\text{FAPAR}_{\text{topo-0m}}$	21
Tabela 3. Comparação dos valores médios anuais da FAPAR encontrados nesse estudo para todo o dia e às 10:30 h com os encontrados por Tian et al. (2004).....	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático da localização da área experimental. Enciclopédia Microsoft Encarta e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).....	6
Figura 2. Variação mensal do total de precipitação e da temperatura média para os km 67 e 83 no período de julho de 2000 a setembro de 2002. As barras representam o desvio padrão da temperatura média.....	6
Figura 3. Relação da fração de radiação difusa (f_{dif}) com a nebulosidade (c).....	10
Figura 4. Grade de 5 X 5 km da área de estimativa da FAPAR pelo MODIS.....	12
Figura 5. Média mensal da (a) PAR incidente observada no topo e a 15 m do dossel no km 67 e (b) PAR incidente e refletida observada no topo do dossel no km 83.....	14
Figura 6. Média horária da $t_{topo-15m}$ no km 67 nos meses de (a) abril, (b) maio, (c) junho, (d) julho, (e) agosto, (f) setembro, (g) outubro, (h) novembro e (i) dezembro de 2001 e (j) janeiro, (l) fevereiro, (m) março, (n) abril e (o) maio de 2002.....	15

Figura 7. Média horária da refletância no km 83 nos meses de (a) junho, (b) julho, (c) agosto, (d) setembro, (e) outubro, (f) novembro e (g) dezembro de 2000 e (h) janeiro, (i) fevereiro, (j) março, (l) abril, (m) maio e (n) junho de 2001.....	16
Figura 8. Média horária da PAR incidente no topo do dossel (PAR_{in}), da sua refletância e do total de precipitação para os meses de novembro de 2000, fevereiro de 2001 e maio de 2001.....	17
Figura 9. Comportamento da (a) transmitância entre o topo e 15 m do km 67 e da (b) refletância do km 83 em relação ao ângulo zenital.....	18
Figura 10. Perfil médio da transmitância derivado de 36 perfis medidos. Fonte: Anhuf e Rollenbeck (2001).....	20
Figura 11. (a) Média mensal da PAR_{in} , $APAR_{topo-0m}$ e $FAPAR_{topo-0m}$ dos dados observados. (b) Linha cheia – média a cada cinco dias da fração evaporativa (fluxo de calor latente durante o dia dividido pela radiação líquida) e linha pontilhada – média mensal da FAPAR de todo o dossel. Adaptado de Rocha et al. (no prelo). (c) Linha cheia – média a cada cinco dias da razão de Bowen (razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente) e linha pontilhada – média mensal da FAPAR de todo o dossel. Adaptado de Rocha et al. (no prelo).....	22
Figura 12. Comportamento da PAR_{in} observada e simulada nos períodos de (a) e (b) 20 a 31/05/2001 (141 a 151) e (c) e (d) 05 a 17/03/2002 (429 a 441) no km 67.....	23
Figura 13. PAR_{in} observada versus simulada para todo o período de dados disponível para o (a) km 83 e (b) km 67.....	24

Figura 14. Comportamento cumulativo da PAR _{in} para todo o período de dados disponível para o (a) km 67 e (b) km 83. Linhas horizontais representam período de falta de dados observados.....	24
Figura 15. Comportamento da (a) refletância da PAR simulada e observada, da (b) FAPAR simulada, da (c) APAR direta e difusa simulada e da (d) FAPAR direta e difusa simulada em relação ao ângulo zenital.....	26
Figura 16. Média mensal da PAR _{in} , APAR e FAPAR simulada.....	26
Figura 17. Distribuição para a América do Sul da FAPAR estimada pelo MODIS para o período de outubro de 2001 a setembro de 2002. Fonte: ftp://crsa.bu.edu/pub/rmyneni/myneniproducts/MODIS	28
Figura 18. Distribuição para a América do Sul do controle de qualidade da FAPAR estimada pelo MODIS para o período de outubro de 2001 a setembro de 2002. Fonte: ftp://crsa.bu.edu/pub/rmyneni/myneniproducts/MODIS	29
Figura 19. Média mensal da FAPAR estimada pelo MODIS e do seu índice de qualidade (IQ).....	31
Figura 20. Média mensal da FAPAR observada, simulada pelo IBIS e estimada pelo MODIS (a) durante todo o dia e (b) às 10:30 hora local.....	32
Figura 21. (a) Fluxo de calor no solo (G) observado versus simulado para todo o período de dados disponível para o km 83 e (b) Comportamento do G observado e simulado no km 83 para o período de 18 a 28 de setembro de 2000.....	33

RESUMO

SENNA, MÔNICA CARNEIRO ALVES, M.S., UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, FEVEREIRO DE 2004. **FRAÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA ABSORVIDA PELA FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA: UMA COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS BASEADAS EM MODELAGEM, SENSORIAMENTO REMOTO E MEDIÇÕES DE CAMPO.** ORIENTADOR: MARCOS HEIL COSTA. CONSELHEIROS: YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO E JOSÉ MARIA NOGUEIRA DA COSTA.

Esta tese tem o objetivo de comparar a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) pela floresta tropical Amazônica obtida por medições de campo, e estimada por modelagem e sensoriamento remoto.

Os dados de campo foram coletados na Floresta Nacional de Tapajós, localizada em Santarém (PA). O modelo utilizado foi o IBIS, que simula os fluxos no sistema solo-vegetação-atmosfera considerando duas camadas de vegetação. Foi utilizado o produto mensal da FAPAR do MODIS, sensor a bordo do satélite Terra.

A FAPAR baseada em observações de campo foi calculada a partir da PAR incidente e refletida no topo do dossel, e incidente a 15 m de altura, e foi posteriormente corrigida para ser representativa de todo o dossel, sendo obtido o valor médio de 0,91. A

FAPAR simulada pelo IBIS apresentou um valor médio de 0,76. A média da FAPAR estimada pelo MODIS foi 0,85.

Os resultados baseados nas medições de campo são coerentes, pois encontram respaldo na literatura. Os valores obtidos pelo IBIS, apesar de inferiores, concordam com os obtidos pelo modelo CLM, porém a amplitude da absorção da PAR pelo dossel precisa ser melhor representada.

ABSTRACT

SENNA, MÔNICA CARNEIRO ALVES, M.S., UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, FEBRUARY 2004. **FRACTION OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION ABSORBED BY AMAZON TROPICAL FOREST: A COMPARISON AMONG ESTIMATES BASED ON MODELING, REMOTE SENSING AND IN SITU MEASUREMENTS.** ADVISER: MARCOS HEIL COSTA. COMMITTEE MEMBERS: YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO AND JOSÉ MARIA NOGUEIRA DA COSTA.

This thesis has the objective to compare the fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FAPAR) by an Amazonian tropical rain forest estimated based on in situ measurements, modeling and remote sensing.

The field measurements were taken in the Tapajós National Forest, located in Santarém, State of Pará, Brazil. The model used was IBIS, which simulates the fluxes in the soil-vegetation-atmosphere system considering two vegetation layers. The monthly FAPAR product of MODIS was used.

FAPAR based on field observations was calculated from incoming and reflected PAR measurements taken above the canopy, and downward PAR at a 15 m height, and was later corrected to be representative of the entire canopy. The annual mean value

obtained was 0.91. FAPAR simulated by IBIS presented an average value of 0.76. The average FAPAR estimated by MODIS was 0.85.

The in situ measurements are consistent with the literature. The values obtained by IBIS, although smaller, agree with the results of CLM, but the amplitude of PAR absorbed by vegetation needs to be better represented.

1. INTRODUÇÃO

Um monitoramento preciso das mudanças na biosfera terrestre tem se tornado extremamente importante devido ao impacto da ação humana nos ecossistemas e na química da atmosfera. Detectar a variabilidade interanual e as tendências de longo prazo na estrutura dos ecossistemas permitirá indicações fundamentais de mudanças biosféricas que, do contrário, passariam despercebidas até o início de uma transformação do bioma.

As florestas tropicais estão entre os mais importantes biomas do planeta devido principalmente à magnitude dos fluxos anuais de energia, água e carbono. Segundo Williams et al. (1998), apesar da extensão das florestas tropicais ser de apenas 8 % da superfície terrestre do globo ($\approx 12.10^6 \text{ km}^2$), elas contêm aproximadamente 40 % da biomassa (240 Pg C) e cerca de 50 % da produção primária líquida da biosfera ($\approx 30 \text{ Pg C a}^{-1}$). Florestas tropicais também são importantes fontes de energia para a atmosfera, com impactos significativos no clima local e extratropical. O seu desmatamento implicaria em alterações como o aumento da temperatura do solo e do ar, redução da evapotranspiração e aumento do escoamento superficial. A maior área contínua de

floresta tropical do mundo está localizada na Bacia Amazônica, cobrindo uma área de mais de 4 milhões de km², 1/3 das florestas tropicais intactas do planeta.

A produtividade de uma superfície vegetada está relacionada, dentre outros fatores, à fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (FAPAR), definida pela razão $APAR / PAR_{in}$, onde PAR_{in} é a radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo do dossel e APAR é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelos tecidos fotossintetizantes do dossel. As variáveis mais significativas na determinação da FAPAR são a cobertura do solo, a área foliar, o ângulo solar, a proporção da radiação difusa e a refletância do solo (Myneni e Williams, 1994; Mariscal et al., 2000; Nouvellon et al., 2000).

Uma estimativa mais detalhada da FAPAR requer um monitoramento de longo prazo com alta resolução temporal e espacial. Enquanto o monitoramento com alta resolução temporal pode ser obtido através de medições com sensores *in-situ*, o sensoriamento remoto é usado para quantificar a heterogeneidade espacial da FAPAR e, como as medidas temporais e espaciais não descrevem completamente o funcionamento do ecossistema, a modelagem é necessária tanto para isolar os processos não medidos do ecossistema como também para proporcionar capacidade de previsão (Running et al., 1999).

Um dos mais recentes avanços no sensoriamento remoto é o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), principal sensor de mapeamento global a bordo do satélite Terra, lançado em dezembro de 1999. O MODIS adquire dados em 36 bandas espectrais distintas, cobrindo o espectro de 0,4 μm a 14,4 μm , e com resoluções espaciais de 250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas) e 1 km (29 bandas) (Cohen e Justice, 1999; Running et al., 1994; Running et al., 1999), sendo ideal para o monitoramento de

mudanças em larga escala na biosfera e para um maior conhecimento do funcionamento do ciclo global do carbono. O uso dos produtos do MODIS vai aperfeiçoar o conhecimento da dinâmica dos processos que ocorrem na superfície terrestre. Tais produtos incluem a refletância e a temperatura da superfície e, a partir daí, os índices espectrais de vegetação, índice de área foliar, cobertura do solo, a produção primária líquida e a fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (FAPAR), dentre outros. Esses produtos têm um papel importante na medição e no monitoramento de variáveis da superfície e no desenvolvimento e validação de modelos globais de simulação de ecossistemas (Cohen e Justice, 1999).

Ao se modelar a transferência de radiação ao longo do dossel usando um modelo baseado em processos, é possível compreender a dinâmica de absorção, transmissão e reflexão da radiação dentro do dossel, seja pelas folhas, galhos ou pela superfície do solo, ao mesmo tempo em que se verifica a habilidade do modelo em reproduzir os valores medidos. O modelo integrado de simulação da biosfera – IBIS (Foley et al., 1996) foi desenvolvido para uma melhor compreensão das conseqüências da atividade humana nos processos biosféricos globais. O IBIS faz parte de uma nova geração de modelos de biosfera global, denominado de modelo dinâmico da vegetação global, que considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em resposta às condições ambientais. Este modelo compreende diversos processos, incluindo as interações entre a superfície e a atmosfera, ciclos de carbono e nutrientes e dinâmica da vegetação (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000). Os processos do IBIS estão organizados hierarquicamente e operam em diferentes intervalos de integração, variando de 60 minutos a 1 ano, permitindo um acoplamento de processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em escalas de tempo distintas (Kucharik et al., 2000).

Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivos:

- estimar, através de dados medidos no campo, a variação temporal da radiação fotossinteticamente ativa absorvida por uma floresta tropical Amazônica primária;
- simular a variação temporal da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) pelo dossel da floresta tropical usando o IBIS;
- obter estimativas da variação temporal da FAPAR de uma floresta tropical Amazônica, através do MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer);
- comparar as estimativas baseadas em medições de campo, modelagem e sensoriamento remoto.

2. METODOLOGIA

2.1. Medições de Campo

Os dados de campo utilizados neste trabalho foram coletados na Floresta Nacional (Flona) de Tapajós, localizada em Santarém (PA), pertencente ao IBAMA. Além de ser uma área de floresta tropical primária, esta unidade foi escolhida para aproveitar a infraestrutura das torres micrometeorológicas, instaladas próximo aos km 67 e 83 da Rodovia Cuiabá-Santarém como parte do Projeto LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia), conforme Figura 1. A vegetação apresenta estrutura de floresta primária não perturbada, com altura média de 40 m e cujos espécimens mais emergentes chegam a atingir 55 m. O tipo de solo predominante é o latossolo amarelo argiloso, pobre em nutrientes e com baixos teores de matéria orgânica (Saleska et al., 2003).

O comportamento médio mensal do total de precipitação e da temperatura média do período estudado está ilustrado na Figura 2. Os maiores totais de precipitação ocorreram no período de janeiro a junho, com um valor médio de 224,8 mm e o período menos chuvoso (de julho a dezembro) teve um valor médio de 61,9 mm. A precipitação média mensal no período estudado foi de 134,3 mm. O valor mínimo foi de 6,1 mm em

dezembro de 2001 e o máximo foi 412,8 mm em abril de 2002. A temperatura média do período foi 25,4°C, com um valor médio máximo de 27,0°C em dezembro de 2001 e mínimo de 23,9°C em fevereiro de 2001.

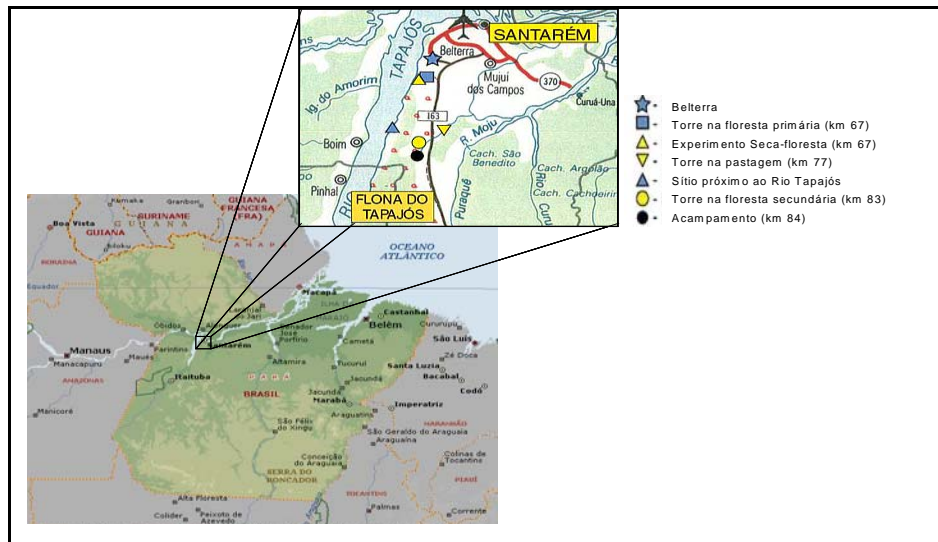


Figura 1. Diagrama esquemático da localização da área experimental. Enciclopédia Microsoft Encarta e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

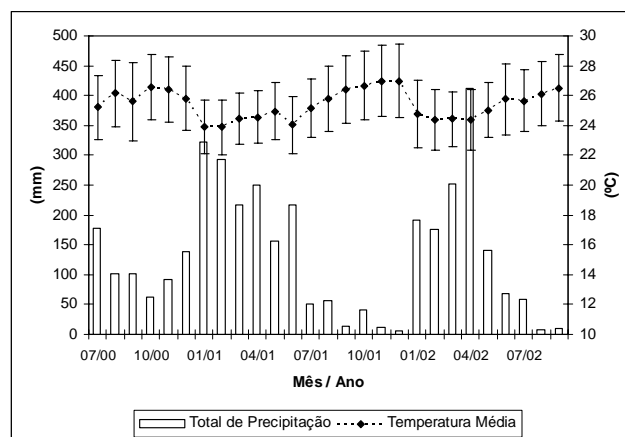


Figura 2. Variação mensal do total de precipitação e da temperatura média para os km 67 e 83 no período de julho de 2000 a setembro de 2002. As barras representam o desvio padrão da temperatura média.

O comportamento sazonal dos componentes da PAR na Flona de Tapajós foi estudado por meio de duas séries temporais, uma coletada na torre próxima ao km 67 da

Rodovia Cuiabá-Santarém, e outra na torre próxima ao km 83. Ambas as torres têm dois sensores de PAR, mas eles estão instalados de maneira diferente. No km 67 (2,855° S; 55,036° W), os sensores estão medindo a PAR incidente, mas um está instalado acima do dossel (58 m de altura – PAR_{in}) enquanto o outro está na parte inferior do dossel (15 m de altura – PAR_{15m}). No km 83 (3,018° S; 54,971° W), ambos estão instalados no topo do dossel, um medindo a PAR incidente (PAR_{in}), e o outro medindo a PAR refletida (PAR_{out}). Portanto, os dados do km 67 servirão para o estudo da penetração de radiação no dossel e os do km 83, para quantificar a radiação refletida pela floresta.

O período da série do km 67 (dados cedidos por Scott Saleska, Harvard University) é de 10/04/2001 a 02/10/2002 e está apresentada em intervalos de uma hora. A série do km 83 (dados cedidos por Humberto Rocha, USP e Scott Miller, UC – Irvine) vai de 29/06/2000 a 30/06/2001 e está apresentada em intervalos de 30 minutos. Esses valores foram coletados previamente ao corte seletivo da floresta no sítio do km 83, que ocorreu em setembro de 2001.

Foram determinadas as variações médias horária e mensal das razões $r = PAR_{out}/PAR_{in}$ (refletância da PAR) e $t_{topo-15m} = PAR_{15m}/PAR_{in}$ (transmitância da PAR entre o topo e 15m). A variação sazonal da FAPAR foi calculada assumindo que r e $t_{topo-15m}$ não variam entre os sítios, e que a PAR refletida pela superfície do solo é desprezível. Segundo Gower et al. (1999), essa variação pode ser calculada pela razão entre os valores medidos abaixo e acima do dossel:

$$FAPAR_{topo-15m} = [(PAR_{in} - PAR_{out}) - (PAR_{15m} - PAR_{out_solo})] / PAR_{in} \quad (1)$$

podendo ser reescrita como:

$$FAPAR_{topo-15m} = 1 - r - t_{topo-15m} \quad (2)$$

2.2. Modelagem

O módulo da superfície terrestre do IBIS simula as trocas de energia, água, CO₂ e *momentum* no sistema solo-vegetação-atmosfera. O modelo representa duas camadas de vegetação (árvores e gramíneas), oito camadas de solo e três de neve. Para capturar o ciclo diurno dos processos biofísicos e fisiológicos, o módulo da superfície terrestre usa um intervalo de integração relativamente curto, de 60 minutos.

A versão IBIS 2.6.4 foi calibrada com os dados de 2000 e 2001 do km 83. Em seguida, o modelo foi rodado pontualmente para o km 67, com o intervalo de integração de 1 hora e para o mesmo período dos dados observados (11/04/2001 a 02/10/2002). O modelo requer os seguintes dados de entrada: velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar incidente e nebulosidade. Desses, a velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação e radiação solar incidente foram observados no km 67, enquanto a nebulosidade foi estimada usando os dados de radiação solar incidente durante o dia e o saldo de radiação durante a noite. Os dados tiveram todas as falhas preenchidas por interpolação de acordo com as seguintes condições:

- Se a falha (f) for menor ou igual a 3 horas:

$$X_i = X_p + \frac{(X_{p+f+1} - X_p)}{f + 1} \cdot (i - p) \quad (3)$$

onde X_i é o valor a ser preenchido, X_p é o antecessor da falha e X_{p+f+1} é o sucessor da falha.

- Se a falha for maior que 3 horas e menor que 24 horas:

$$X_i = X_{i-24} + \frac{[(p + f + 1) - i]}{f + 1} \cdot (X_p - X_{p-24}) + \frac{(i - p)}{f + 1} \cdot (X_{p+f+1} - X_{p+f+1-24}) \quad (4)$$

- Se a falha for maior ou igual a 24 horas:

$$X_i = X_{i-24m} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1} \cdot (X_p - X_{p-24m}) + \frac{(i-p)}{f+1} \cdot (X_{p+f+1} - X_{p+f+1-24m}) \quad (5)$$

onde m é a parte inteira de $(\frac{f}{24} + 1)$. Essas equações de interpolação fazem com que o período sem dados siga o mesmo comportamento de um período similar com dados, preenchendo as falhas de forma mais realística do que uma interpolação linear.

No IBIS a radiação solar é calculada para cada nível de vegetação com cálculos separados para a radiação direta e difusa em duas bandas de comprimento de onda (visível e infravermelho próximo). A PAR incidente (PAR_{in}) é calculada em função da radiação solar incidente:

$$PAR_{in} = PAR_{udir} + PAR_{udif} \quad (6)$$

$$PAR_{in} = [Q_{topo} \cdot 4,59 \cdot f_{vis} \cdot (1-f_{dif})] + [Q_{topo} \cdot 4,59 \cdot f_{vis} \cdot f_{dif}] \quad (7)$$

Segundo Nikolov e Zeller (1992) e Friend (1998):

$$f_{dif} = 1,0045 + 0,0435 \cdot (0,76 - 0,509 \cdot c) - 3,5227 \cdot (0,76 - 0,509 \cdot c)^2 + 2,6313 \cdot (0,76 - 0,509 \cdot c)^3 \quad (8a)$$

$$f_{dif} = 0,166 \text{ se } c < 0,02 \quad (8b)$$

onde PAR_{udir} é a PAR direta incidente no dossel superior, PAR_{udif} é a PAR difusa incidente no dossel superior, Q_{topo} é a radiação solar incidente no topo do dossel medida na torre, f_{vis} é a fração de energia na banda do visível (0,427), f_{dif} é a fração da radiação solar difusa e c é a nebulosidade e varia de 0 a 1. A relação da f_{dif} com a nebulosidade está ilustrada na Figura 3.

A APAR total é calculada como a soma da APAR do dossel superior e inferior:

$$APAR_t = (PAR_{udir} \cdot a_{udir} + PAR_{udif} \cdot a_{udif}) + (PAR_{ldir} \cdot a_{ldir} + PAR_{ldif} \cdot a_{ldif}) \quad (9)$$

onde $a_{u\text{dir}}$ é a fração da PAR direta absorvida pelo dossel superior, $a_{u\text{dif}}$ é a fração da PAR difusa absorvida pelo dossel superior. $PAR_{l\text{dir}}$ é a PAR direta incidente no dossel inferior e $a_{l\text{dir}}$ é a fração dessa radiação absorvida pelo dossel inferior. $PAR_{l\text{dif}}$ e $a_{l\text{dif}}$ têm o mesmo significado, porém para a PAR difusa.

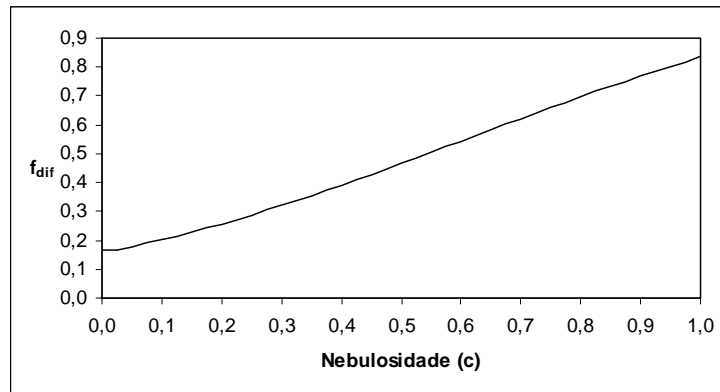


Figura 3. Relação da fração de radiação difusa (f_{dif}) com a nebulosidade (c).

Para o cálculo distinto da APAR pelas folhas e galhos, as seguintes equações foram usadas:

$$APAR_{\text{folhas}} = \frac{APAR_t \cdot LAI}{LAI + SAI} \quad (10)$$

$$APAR_{\text{galhos}} = \frac{APAR_t \cdot SAI}{LAI + SAI} \quad (11)$$

onde LAI é o índice de área foliar e o SAI é o índice de área dos galhos.

A FAPAR foi calculada para cada hora do dia através da razão:

$$FAPAR = \frac{APAR_t}{PAR_{in}} \quad (12)$$

O código do IBIS 2.6.4 é disponibilizado gratuitamente e está escrito em Fortran 77.

2.3. Sensoriamento Remoto

O produto FAPAR do MODIS é produzido com uma resolução espacial de 1 km, podendo ser diário (MOD15A1), composto num período de oito dias (MOD15A2) baseado no valor máximo da FAPAR, ou composto num período de um mês (MOD15_BU). O algoritmo para estimativa da FAPAR é baseado numa rigorosa teoria de transferência radiativa tridimensional que é otimizada por inversão usando tabelas de referência e aproximações sofisticadas para resolver a equação de transporte radiativo (Privette et al., 2002; Myneni et al., 2002). Possui interfaces com os produtos de refletância da superfície (MOD09) e cobertura do solo (MOD12) do MODIS. Quando esse método falha ao localizar uma solução, um algoritmo reserva é utilizado baseado nas relações entre o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e a FAPAR (Myneni et al., 2002; Knyazikhin et al., 1999).

O produto utilizado neste trabalho é o MOD15_BU – coleção 4, que é produzido e distribuído pela Universidade de Boston e disponível no endereço <ftp://crsa.bu.edu/pub/rmyneni/myneniprducts/MODIS>. O período estudado foi de outubro de 2001 a setembro de 2002. A área de estudo possui 25 células com 1 km² cada, e situa-se entre 2,85° S e 2,88° S e entre 55,05° W e 55,01° W, região que inclui a torre do km 67 (Figura 4).

Para cada célula foi obtido o valor da FAPAR e do controle de qualidade (QA) que informa o tipo de algoritmo utilizado ou a inexistência de dados. A média mensal da FAPAR foi obtida através da média aritmética dos 25 pontos da grade, quando existentes. A partir do valor do QA foi calculado um índice de qualidade que assume, para cada célula, valores de 4,0 a 2,5 se o algoritmo primário tiver sido usado, e de 2,0 a 0,5 no caso do algoritmo secundário. O índice de qualidade total (IQ) é a soma dos

índices de qualidade individuais para as 25 células, e varia de 0 a 100. Quanto maior for o IQ melhor é a qualidade da FAPAR estimada.

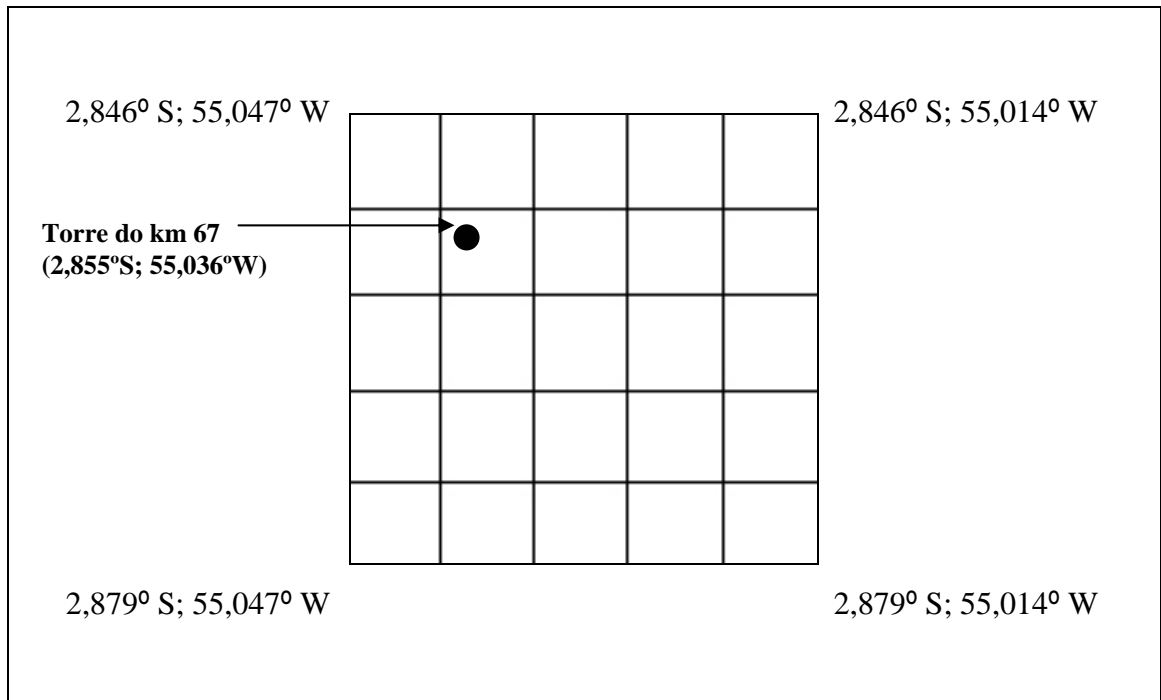


Figura 4. Grade de 5 x 5 km da área de estimativa da FAPAR pelo MODIS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Medições de Campo

A variação média mensal da radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo do dossel (PAR_{in}) e a 15 m do dossel (PAR_{15m}) do sítio do km 67 é apresentada na Figura 5a. As médias mensais da PAR_{in} variaram de 640 a 850 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, com um valor médio de 732 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. As médias mensais de PAR_{15m} variaram de 129 a 404 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, com um valor médio de 239 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. A Figura 5b mostra a variação média mensal da PAR_{in} e da PAR refletida no topo do dossel (PAR_{out}) do sítio do km 83. Os valores mínimo, médio e máximo mensais da PAR_{in} foram 536, 693 e 894 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e para a PAR_{out} foram 21, 25 e 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectivamente. Em ambos os sítios os valores máximos ocorreram durante a estação seca e os mínimos durante a estação chuvosa, quando a nebulosidade é mais acentuada.

A Figura 6 mostra a variação média horária da transmitância da PAR entre o topo do dossel e 15 m ($t_{topo-15m}$) da PAR da floresta Amazônica no sítio do km 67 para os meses de abril de 2001 a maio de 2002. Em geral, observa-se que os maiores valores de $t_{topo-15m}$ ocorrem em torno do meio-dia, pois os raios solares incidem de maneira mais perpendicular e, portanto, têm uma penetração mais efetiva no dossel. Os valores

máximos (em torno de 0,7) ocorreram nos meses de agosto e setembro de 2001 (Figuras 6e e 6f), pois são os meses que o ângulo de declinação solar está mais próximo à latitude local. Os valores máximos de $t_{\text{topo-15m}}$ no início da série são um pouco maiores, pois o sensor a 15m foi instalado numa pequena clareira aberta para instalar a torre. A partir de outubro de 2001, ocorre um decréscimo da $t_{\text{topo-15m}}$, devido à menor altura solar e ao fechamento da clareira.

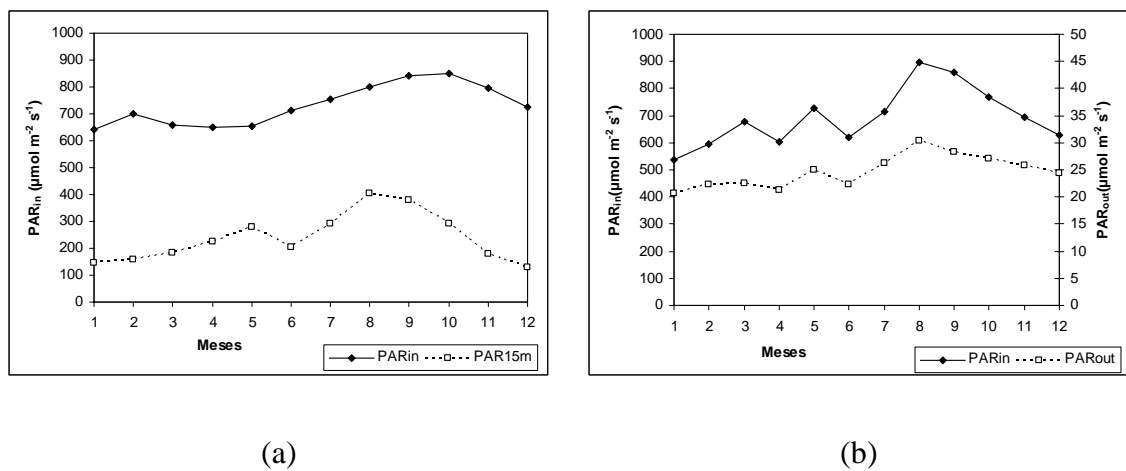
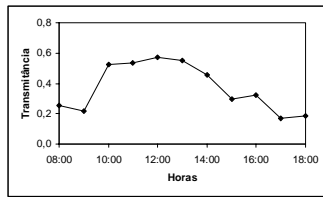
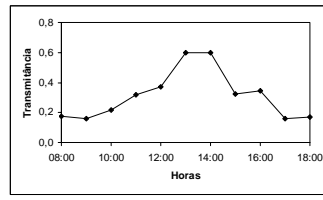


Figura 5. Média mensal da (a) PAR incidente observada no topo e a 15 m do dossel no km 67 e (b) PAR incidente e refletida observada no topo do dossel no km 83.

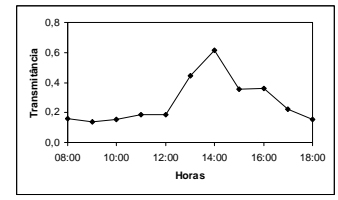
Na Figura 7 está ilustrada a variação média horária da refletância da PAR (r) da floresta no sítio do km 83 para os meses de junho de 2000 a junho de 2001. A refletância média foi de $0,03 \pm 0,01$, com valores um pouco menores entre 10 e 14h, pois ângulos zenitais pequenos permitem que maiores profundidades sejam atingidas pela luz no interior do dossel de uma floresta, o que contribui para uma maior absorção da radiação incidente, fazendo com que a refletância seja menor.



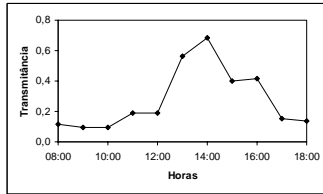
(a) Abril de 2001



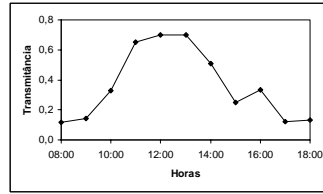
(b) Maio de 2001



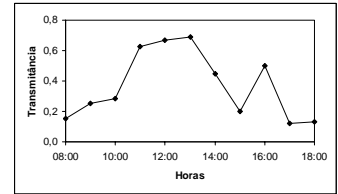
(c) Junho de 2001



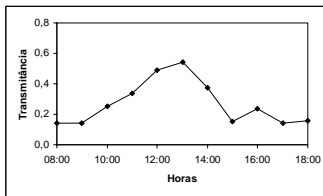
(d) Julho de 2001



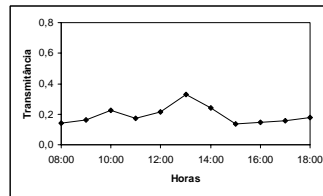
(e) Agosto de 2001



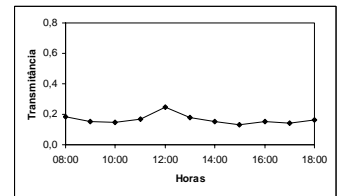
(f) Setembro de 2001



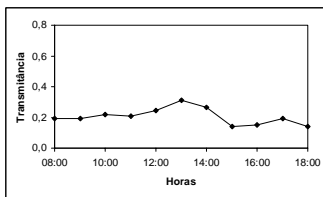
(g) Outubro de 2001



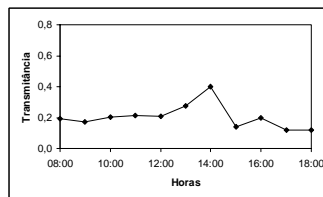
(h) Novembro de 2001



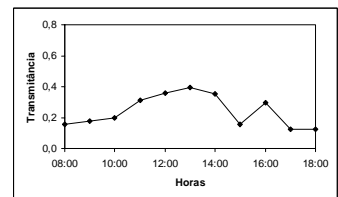
(i) Dezembro de 2001



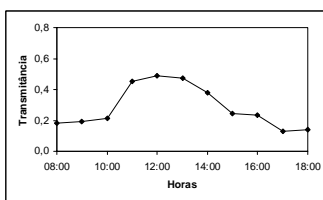
(j) Janeiro de 2002



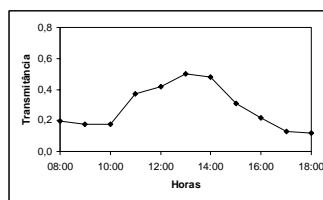
(l) Fevereiro de 2002



(m) Março de 2002



(n) Abril de 2002



(o) Maio de 2002

Figura 6. Média horária da $t_{\text{topo-15m}}$ no km 67 nos meses de (a) abril, (b) maio, (c) junho, (d) julho, (e) agosto, (f) setembro, (g) outubro, (h) novembro e (i) dezembro de 2001 e (j) janeiro, (l) fevereiro, (m) março, (n) abril e (o) maio de 2002.

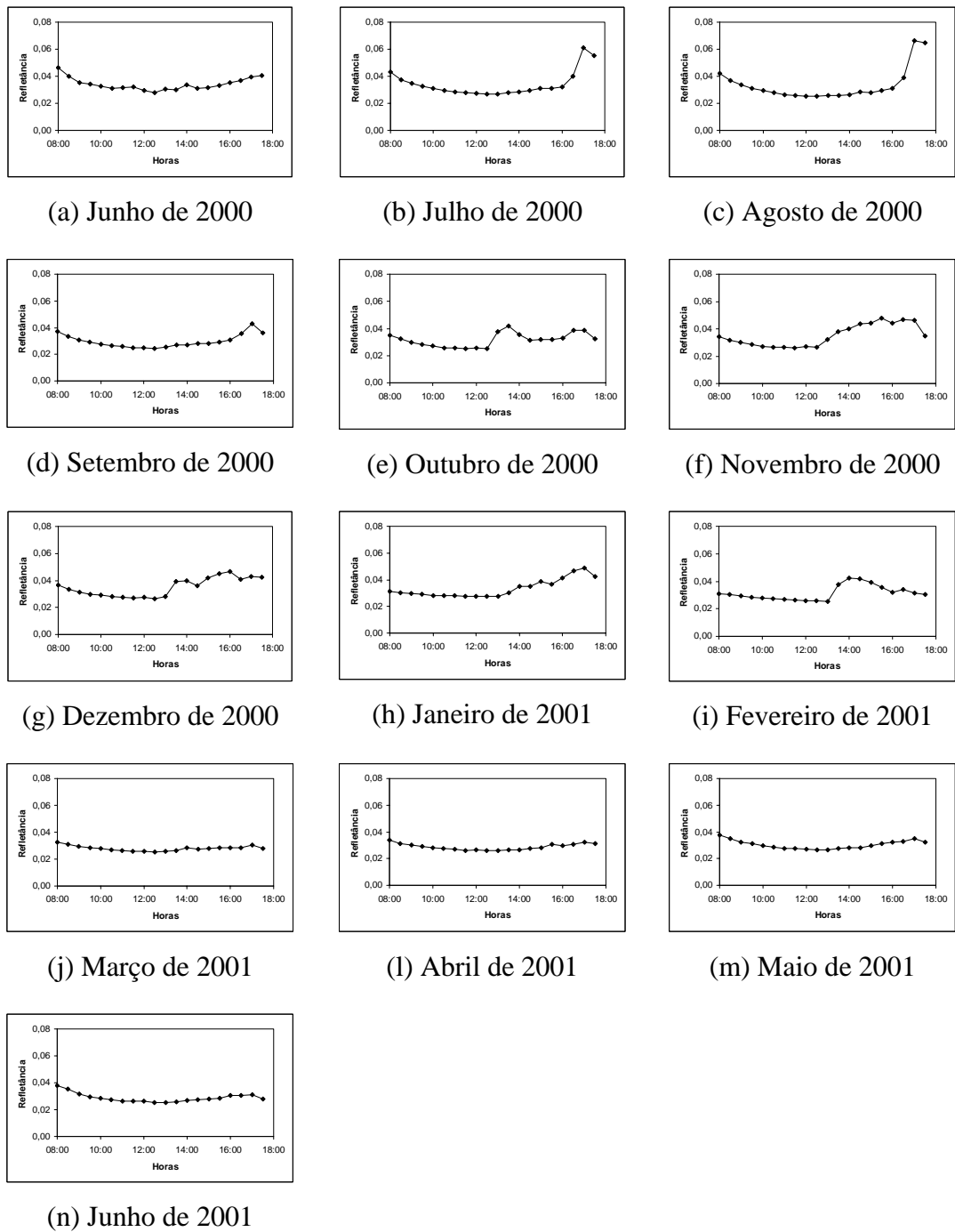


Figura 7. Média horária da refletância no km 83 nos meses de (a) junho, (b) julho, (c) agosto, (d) setembro, (e) outubro, (f) novembro e (g) dezembro de 2000 e (h) janeiro, (i) fevereiro, (j) março, (l) abril, (m) maio e (n) junho de 2001.

Entretanto, em alguns meses ocorreu um acréscimo de r a partir de aproximadamente 13h (Figuras 8a e 8c). Em princípio, essa assimetria no ciclo diurno de r pode estar associada a vários fatores como molhamento foliar, desnivelamento do sensor, heterogeneidade da vegetação ou o aumento da fração de radiação difusa, devido ao aumento de nebulosidade. Neste caso específico, como a assimetria ocorre em alguns meses do ano, mas não em outros, o mais provável é que a causa da assimetria esteja relacionada à nebulosidade.

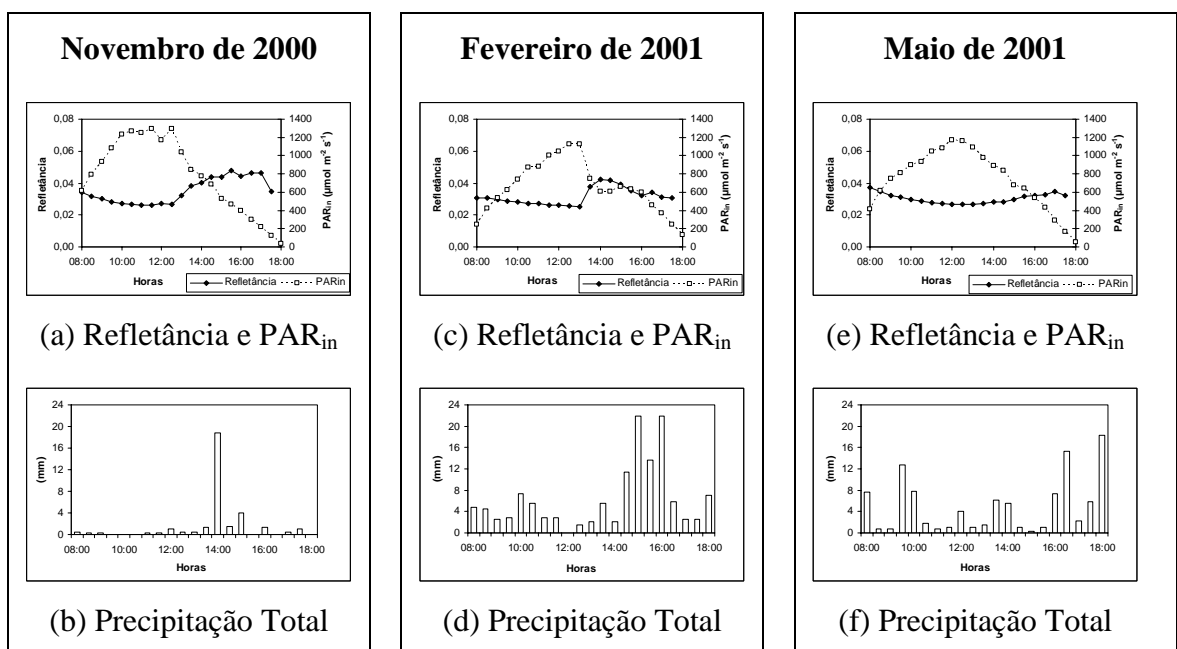


Figura 8. Média horária da PAR incidente no topo do dossel (PAR_{in}), da sua refletância e do total de precipitação para os meses de novembro de 2000, fevereiro de 2001 e maio de 2001.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Nouvellon et al. (2000), que estudaram o efeito da nebulosidade na absorção de PAR para uma cobertura gramada no México. Eles concluíram que para ângulos zenitais pequenos a FAPAR difusa foi maior que a direta e para ângulos zenitais grandes ocorreu o inverso. A FAPAR total diária foi maior para dias nublados. Entretanto, para altos valores do LAI a FAPAR de dias nublados pode ser levemente menor que para dias claros.

A relação da $t_{\text{topo-15m}}$ com o ângulo zenital está ilustrada na Figura 9a. Conforme dito anteriormente, os menores valores de $t_{\text{topo-15m}}$ ocorrem nos maiores valores do ângulo zenital porque quanto maior o ângulo zenital, maior será o caminho percorrido pela radiação dentro do dossel, portanto a chance de ocorrer uma absorção por folhas e galhos aumenta. Para ângulos zenitais menores que 5° , os valores da $t_{\text{topo-15m}}$ são destacadamente maiores que os demais, devido à clareira na floresta que permitia que luz solar direta penetrasse mais profundamente.

A Figura 9b mostra a relação de r com o ângulo zenital. Como esperado, ocorre um comportamento inverso da transmitância e a refletância aumenta com o ângulo zenital.

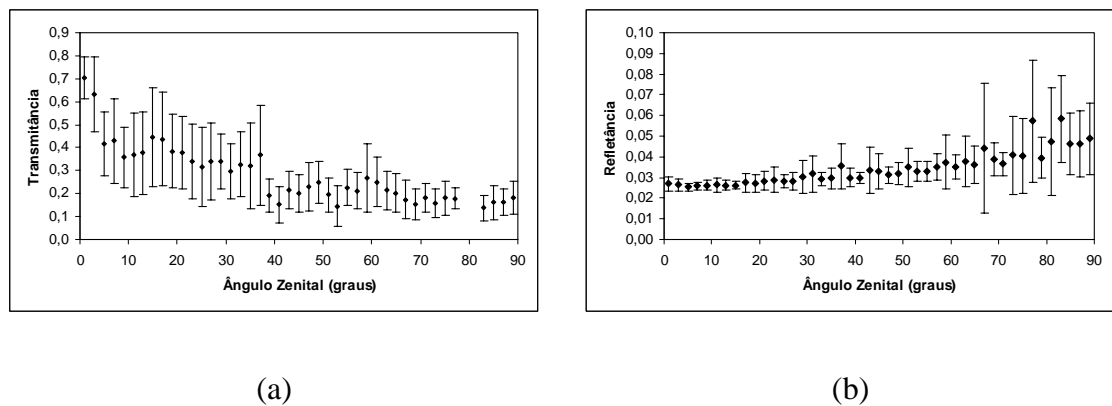


Figura 9. Comportamento da (a) transmitância entre o topo e 15 m do km 67 e da (b) refletância do km 83 em relação ao ângulo zenital.

As médias mensais da $t_{\text{topo-15m}}$, r e $\text{FAPAR}_{\text{topo-15m}}$ são apresentadas na Tabela 1. O valor da $t_{\text{topo-15m}}$ variou de 0,168 a 0,452, com um valor médio de 0,308. O valor de r variou de 0,027 a 0,033, com um valor médio de 0,030, enquanto a $\text{FAPAR}_{\text{topo-15m}}$ variou de 0,519 a 0,799 com um valor médio aproximado de 0,668.

Para corrigir a transmitância entre o topo do dossel e 15 m ($t_{\text{topo-15m}}$) para todo o dossel ($t_{\text{topo-0m}}$) foram usadas as relações obtidas por Anhuf e Rollenbeck (2001), que estudaram o comportamento da transmitância da PAR numa floresta tropical na

Venezuela, por meio de medições da PAR a cada 10 minutos em cinco níveis (0, 5, 12, 21 e 42m). Entre 5 e 21m, a coleta de dados foi feita por um sensor acoplado a um sistema elétrico que subia ou descia a uma velocidade constante. Foram obtidos 36 perfis de diferentes pontos da floresta e a média dos mesmos está ilustrada na Figura 10.

Tabela 1. Médias mensais da $t_{\text{topo-15m}}$, r e $\text{FAPAR}_{\text{topo-15m}}$.

	$t_{\text{topo-15m}}$	r	$\text{FAPAR}_{\text{topo-15m}}$
Janeiro	$0,215 \pm 0,053$	$0,031 \pm 0,007$	0,754
Fevereiro	$0,221 \pm 0,080$	$0,031 \pm 0,005$	0,749
Março	$0,308 \pm 0,102$	$0,027 \pm 0,003$	0,665
Abril	$0,330 \pm 0,136$	$0,028 \pm 0,003$	0,642
Mai	$0,332 \pm 0,141$	$0,029 \pm 0,007$	0,639
Junho	$0,303 \pm 0,155$	$0,028 \pm 0,006$	0,669
Julho	$0,340 \pm 0,206$	$0,031 \pm 0,009$	0,629
Agosto	$0,452 \pm 0,238$	$0,029 \pm 0,012$	0,519
Setembro	$0,437 \pm 0,223$	$0,028 \pm 0,008$	0,535
Outubro	$0,317 \pm 0,146$	$0,030 \pm 0,009$	0,652
Novembro	$0,206 \pm 0,058$	$0,032 \pm 0,011$	0,762
Dezembro	$0,168 \pm 0,031$	$0,033 \pm 0,008$	0,799
Média Anual Ponderada:	0,308	0,030	0,668

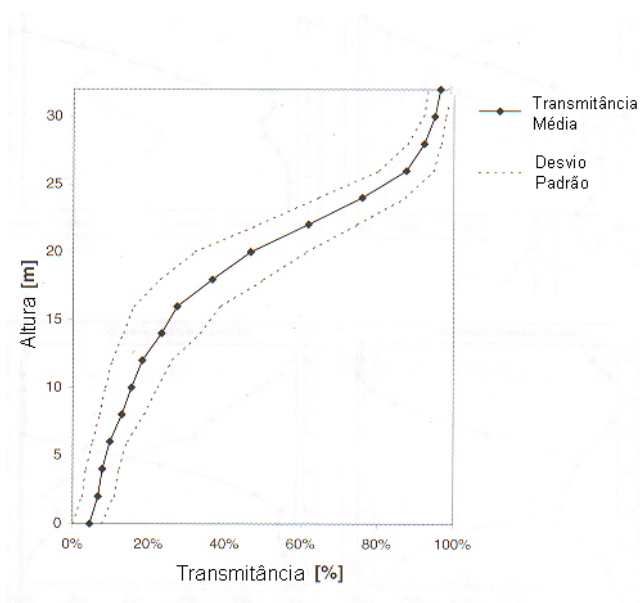


Figura 10. Perfil médio da transmitância derivado de 36 perfis medidos. Fonte: Anhuf e Rollenbeck (2001).

De acordo com os resultados obtidos por Anhuf e Rollenbeck (2001), a razão entre a transmitância de todo o dossel (4,5%) e a transmitância acima de 15m (24%) é 0,1875. Esses dados estão consistentes com os dados de Januário et al. (1992), que compararam a radiação solar global dentro e fora da floresta em Tucuruí, Pará (através de três sensores instalados aleatoriamente no solo da floresta e um sensor localizado em área aberta), obtendo que a fração da radiação total média penetrante foi de 4,7% da radiação incidente.

Assim, os valores de $t_{\text{topo-15m}}$ foram corrigidos por essa razão (0,1875) para obtenção dos valores de $t_{\text{topo-0m}}$. A Tabela 2 mostra os valores médios mensais de r , da $t_{\text{topo-0m}}$ e da $FAPAR_{\text{topo-0m}}$. Os novos valores da $t_{\text{topo-0m}}$ variaram de 0,032 a 0,085, com um valor médio de 0,057, sendo compatíveis com os valores obtidos por Anhuf e Rollenbeck (2001) – 0,045 para PAR – e por Januário et al. (1992) – 0,047 para radiação solar global. A $FAPAR_{\text{topo-0m}}$ variou de 0,886 a 0,935 com um valor médio de 0,914. Na Figura 11a está ilustrado o comportamento médio mensal da PAR_{in} , da $FAPAR_{\text{topo-0m}}$ e

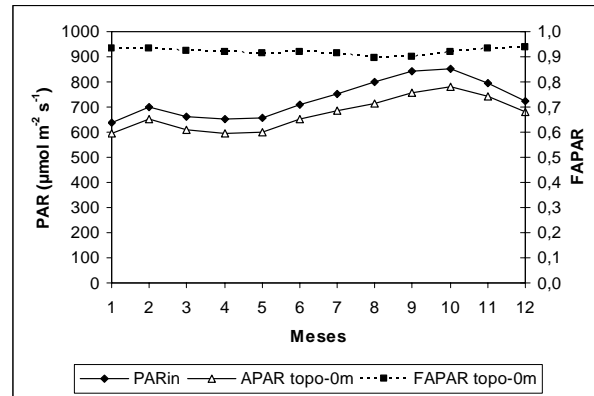
da $APAR_{\text{topo-0m}}$. A $FAPAR_{\text{topo-0m}}$ variou pouco, e os seus menores valores ocorreram em agosto e setembro, período em que os valores de transmitância foram maiores devido ao efeito da clareira.

Tabela 2. Médias mensais da $t_{\text{topo-0m}}$, r e $FAPAR_{\text{topo-0m}}$.

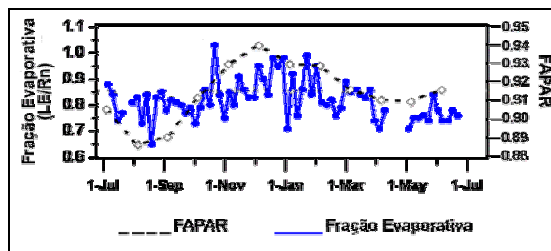
	$t_{\text{topo-0m}}$	r	$FAPAR_{\text{topo-0m}}$
Janeiro	0,040	0,031	0,929
Fevereiro	0,041	0,031	0,928
Março	0,058	0,027	0,915
Abril	0,062	0,028	0,910
Mai	0,062	0,029	0,909
Junho	0,057	0,028	0,915
Julho	0,064	0,031	0,905
Agosto	0,085	0,029	0,886
Setembro	0,082	0,028	0,890
Outubro	0,059	0,030	0,911
Novembro	0,039	0,032	0,929
Dezembro	0,032	0,033	0,935
Média Anual:	0,057	0,030	0,914

Os valores da $FAPAR_{\text{topo-0m}}$ média mensal foram comparados aos valores médios da fração evaporativa (Figura 11b) e da razão de Bowen (Figura 11c), obtidos por Rocha et al. (no prelo) que mediram os fluxos de calor sensível e vapor d' água, dentre outros, para o sítio do km 83 no período de julho de 2000 a julho de 2001. A Figura 11b mostra que o comportamento médio da fração evaporativa tende a seguir o comportamento da $FAPAR$. Já o comportamento médio da razão de Bowen é anti-correlacionado com a $FAPAR$ (Figura 11c). Isto ocorre pois quanto maior for a $FAPAR$, maior será a

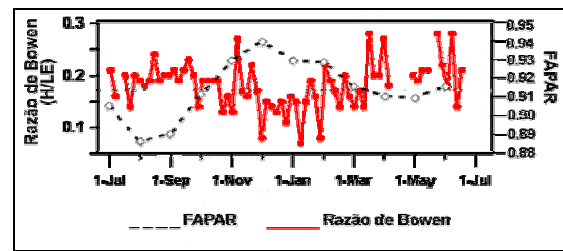
fotossíntese líquida e a condutância estomática, aumentando o fluxo de calor latente, fazendo com que os valores da fração evaporativa sejam maiores e os valores da razão de Bowen menores.



(a)



(b)

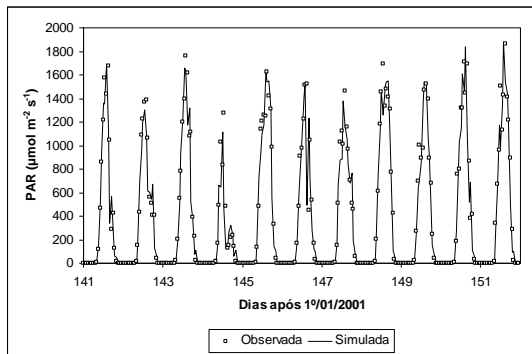


(c)

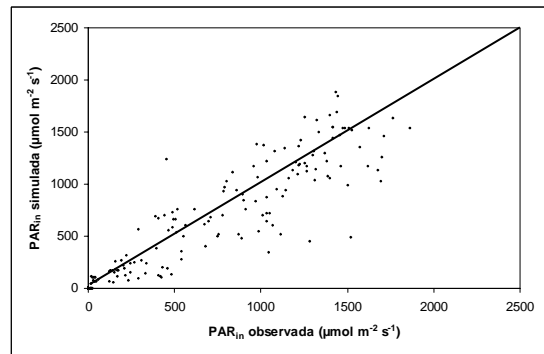
Figura 11. (a) Média mensal da PAR_{in} , $APAR_{topo-0m}$ e $FAPAR_{topo-0m}$ dos dados observados. (b) Linha cheia – média a cada cinco dias da fração evaporativa (fluxo de calor latente durante o dia dividido pela radiação líquida) e linha pontilhada – média mensal da FAPAR de todo o dossel. Adaptado de Rocha et al. (no prelo). (c) Linha cheia – média a cada cinco dias da razão de Bowen (razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente) e linha pontilhada – média mensal da FAPAR de todo o dossel. Adaptado de Rocha et al. (no prelo).

3.2. Modelagem

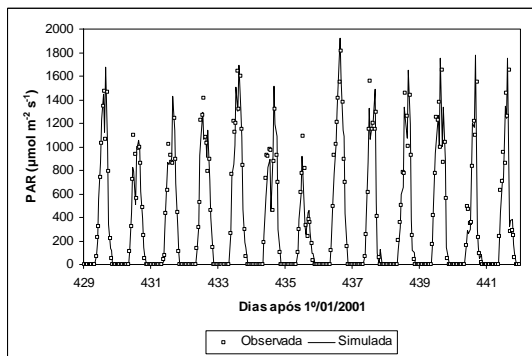
A Figura 12 mostra a PAR_{in} observada e simulada nos períodos de 20 a 31/05/2001 (Figura 12a e 12b) e de 05 a 17/03/2002 (Figura 12c e 12d) para o km 67. Em geral, houve um bom ajuste do modelo. Na Figura 13 observa-se a dispersão da PAR_{in} para todo o período disponível dos km 67 e 83.



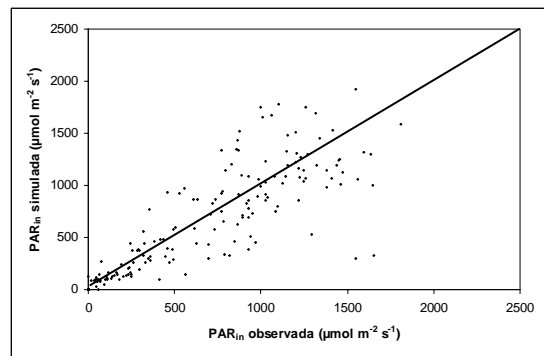
(a)



(b)

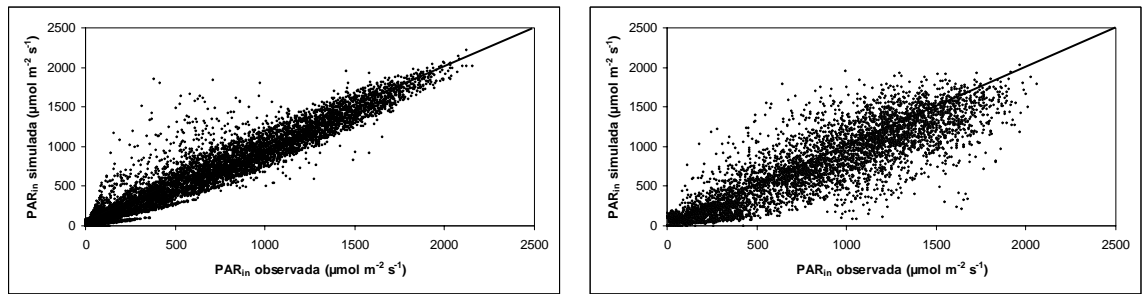


(c)



(d)

Figura 12. Comportamento da PAR_{in} observada e simulada nos períodos de (a) e (b) 20 a 31/05/2001 (141 a 151) e (c) e (d) 05 a 17/03/2002 (429 a 441) no km 67.

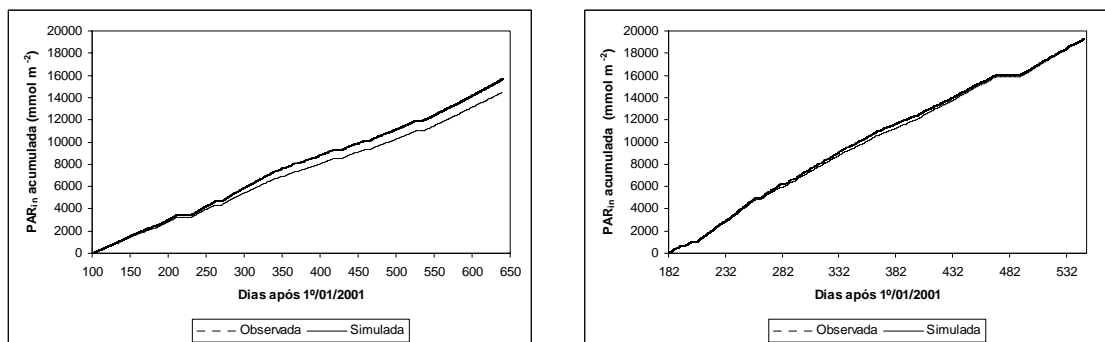


(a) km 83

(b) km 67

Figura 13. PAR_{in} observada versus simulada para todo o período de dados disponível para o (a) km 83 e (b) km 67.

A Figura 14 mostra a PAR_{in} acumulada neste ecossistema (observada e simulada) para todo o período de dados nos km 67 e 83. Pelo comportamento das curvas, o modelo não teve tendência dominante nem de subestimar nem de superestimar os valores observados para o km 83. Entretanto, para o km 67 o modelo teve a tendência de subestimar ligeiramente os valores observados em 7,7%.



(a) km 67

(b) km 83

Figura 14. Comportamento cumulativo da PAR_{in} para todo o período de dados disponível para o (a) km 67 e (b) km 83. Linhas horizontais representam período de falta de dados observados.

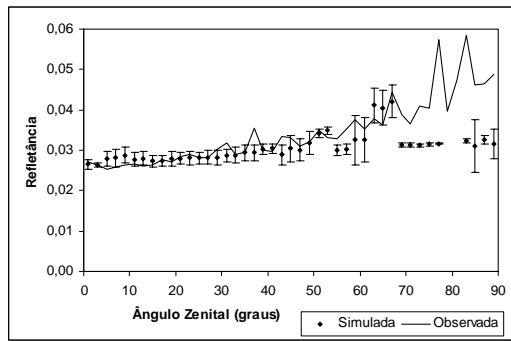
O comportamento médio da refletância da PAR simulada e observada em relação ao ângulo zenital está ilustrado na Figura 15a. A refletância simulada aumenta com o ângulo zenital, porém com menor intensidade se comparada à observada. A refletância simulada média ficou em torno de 0,03, semelhante ao encontrado nos dados observados.

A Figura 15b mostra o comportamento da FAPAR média simulada em relação ao ângulo zenital. A FAPAR é ligeiramente menor quando o ângulo zenital é maior, devido à maior reflexão dos raios solares por folhas e galhos. O valor médio da FAPAR simulada foi aproximadamente 0,76.

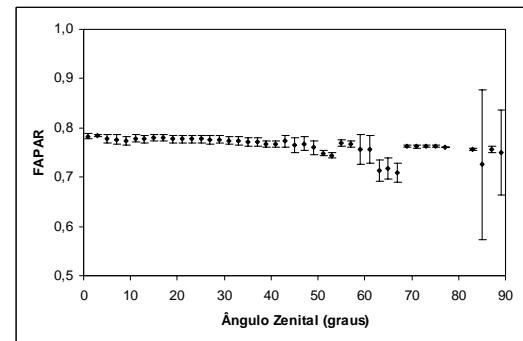
Na Figura 15c está ilustrado o comportamento simulado da APAR direta e difusa. Em valores de ângulo zenital menores que 70°, a APAR direta se manteve em média acima da APAR difusa. Esse quadro se inverte quando o ângulo zenital é maior que 70° devido a interação da radiação solar com galhos e folhas. O valor médio da APAR direta foi $355,7 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e da difusa foi $274,6 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

O comportamento da FAPAR direta e difusa simulada está ilustrado na Figura 15d. A FAPAR difusa se manteve aproximadamente constante (0,762) para qualquer valor do ângulo zenital. A FAPAR direta decresceu com o ângulo zenital e seu valor médio foi 0,769.

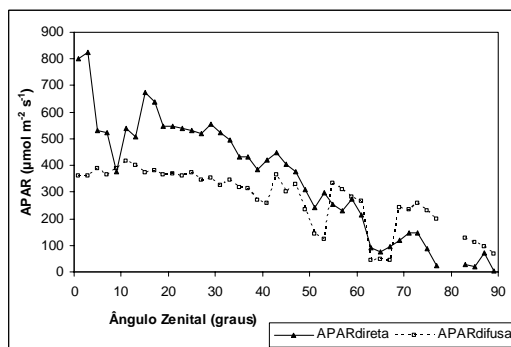
Na Figura 16 está ilustrado o comportamento médio mensal simulado da PAR_{in} , APAR e FAPAR entre o solo e o topo do dossel. A FAPAR variou ligeiramente entre 0,755 e 0,763. Tian et al. (2004) simularam a FAPAR sobre a Amazônia usando o *Common Land Model* (CLM) e os valores variaram entre 0,80 e 0,85 para o ano de 2001, considerando apenas o valor da FAPAR das 10:30, hora local.



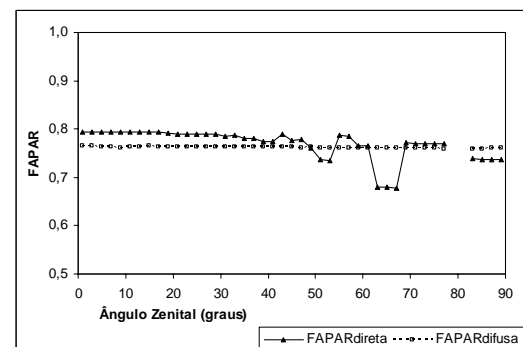
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 15. Comportamento da (a) refletância da PAR simulada e observada, da (b) FAPAR simulada, da (c) APAR direta e difusa simulada e da (d) FAPAR direta e difusa simulada em relação ao ângulo zenital.

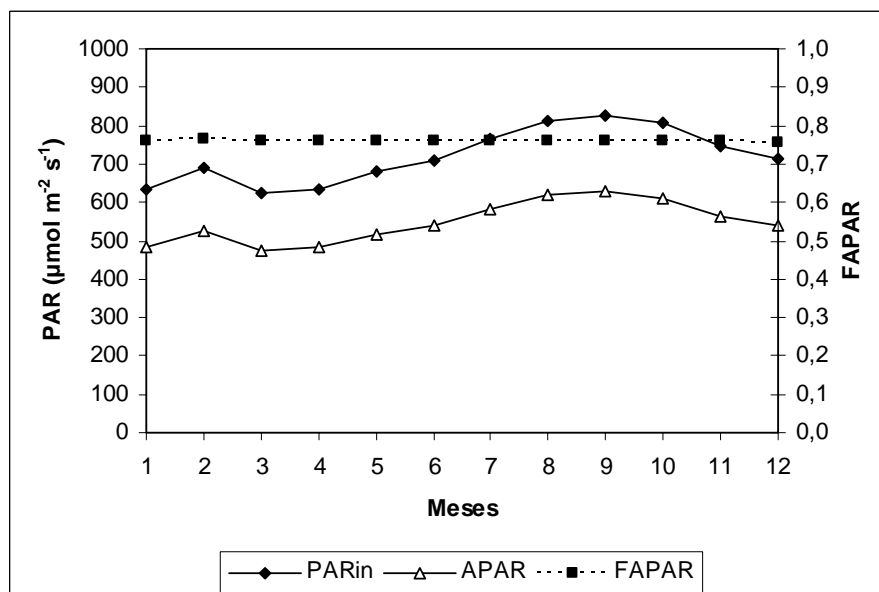


Figura 16. Média mensal da PAR_{in} , APAR e FAPAR simulada.

3.3. Sensoriamento Remoto

A FAPAR na América do Sul estimada pelo MODIS e o tipo de algoritmo utilizado para a sua estimativa são apresentados nas Figuras 17 e 18, respectivamente, para os meses de outubro de 2001 a setembro de 2002. Na maior parte do tempo, as estimativas da FAPAR sobre a Amazônia são obtidas via algoritmo secundário, menos confiável que o principal. Isto se deve à constante presença de nebulosidade na região que contamina as medições feitas pelo sensor remoto (Tian et al., 2004). Assim, a qualidade dos dados sobre a Amazônia melhora na estação seca, principalmente no mês de julho de 2002, e percebe-se um aumento da área onde o algoritmo principal da FAPAR foi usado.

Yang et al. (no prelo) analisaram a performance do algoritmo que estima a FAPAR para o período de julho de 2000 a dezembro de 2002, e concluíram que cerca de 70% das estimativas globais são obtidas pelo algoritmo principal. A composição temporal de oito dias para um mês aumenta a frequência do uso do algoritmo principal. As falhas do algoritmo principal ocorrem quando a refletância tem grandes incertezas, especialmente em condições de neve e nebulosidade. As estimativas pelo algoritmo secundário têm uma qualidade inferior.

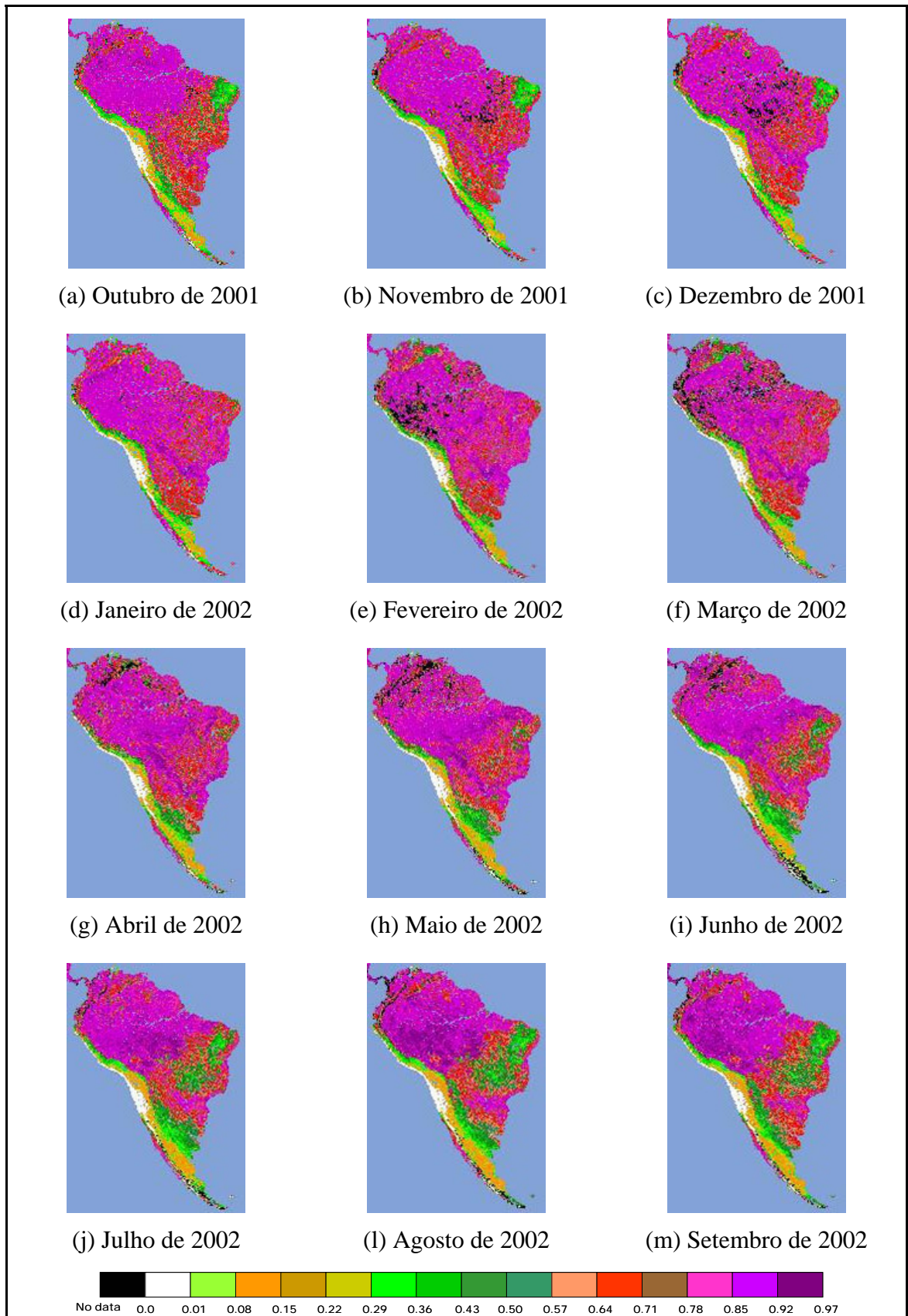


Figura 17. Distribuição para a América do Sul da FAPAR estimada pelo MODIS para o período de outubro de 2001 a setembro de 2002. Fonte: <ftp://crsa.bu.edu/pub/rmyneni/myneniproducts/MODIS>.

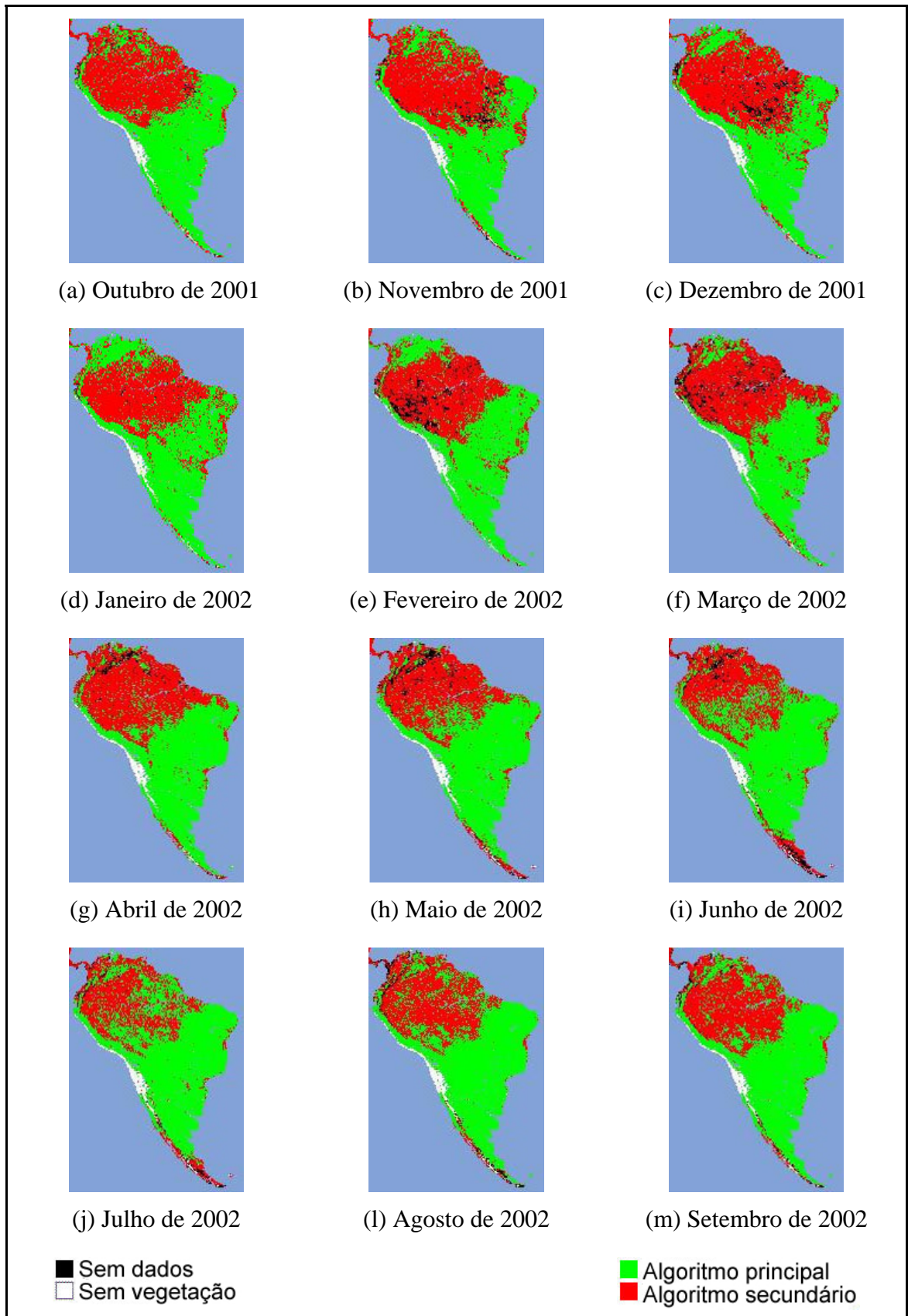


Figura 18. Distribuição para a América do Sul do controle de qualidade da FAPAR estimada pelo MODIS para o período de outubro de 2001 a setembro de 2002. Fonte: <ftp://crsa.bu.edu/pub/rmyneni/myneniprducts/MODIS>.

A Figura 19 mostra a variação média mensal da FAPAR estimada pelo MODIS e o seu índice de qualidade (IQ), obtidos numa grade de 5 X 5 pontos de 1 km². Durante o mês de março de 2002 não houve dados para a região em estudo, devido aos problemas apresentados pelo MODIS neste período (Yang et al., no prelo). A FAPAR teve um valor médio de 0,853 durante todo o período. Os meses de maior confiabilidade dos dados são junho e julho, que têm menor nebulosidade e como as Figuras 17 e 18 indicam, são os meses de maior uso do algoritmo principal na região. Os meses com menor confiabilidade são janeiro, fevereiro, março e abril, que possuem as maiores taxas de precipitação, quando a estimativa está mais contaminada pela presença de nebulosidade. As médias da FAPAR considerando apenas as estimativas feitas pelo algoritmo principal e pelo algoritmo secundário foram 0,815 e 0,876, respectivamente. Foi feito um teste t com 95% de nível de probabilidade e 75 graus de liberdade e concluiu-se que as médias do algoritmo primário e secundário são significativamente diferentes ($t_{\text{tabelado}} = -1,99$ e $t_{\text{calculado}} = -2,87$).

Tian et al. (2004) estudaram a variação sazonal da FAPAR estimada pelo MODIS sobre a Amazônia para o ano de 2001, obtendo um valor médio aproximado de 0,85, e também observando uma forte contaminação dos dados.

Shabanov et al. (2003) pesquisaram o efeito da heterogeneidade foliar das florestas no algoritmo que calcula a FAPAR no MODIS. Eles concluíram que as variações da FAPAR devido ao LAI são tão importantes quanto as variações relacionadas ao ângulo zenital. O efeito do ângulo zenital é consideravelmente menor em vegetações mais densas. Portanto, o uso da estimativa da FAPAR por sensoriamento remoto se justifica.

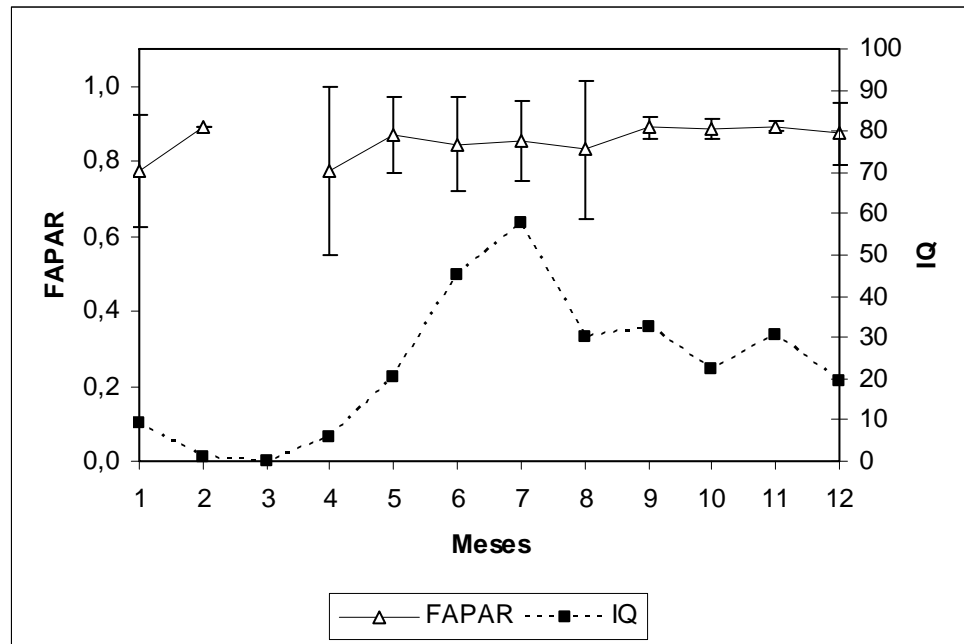


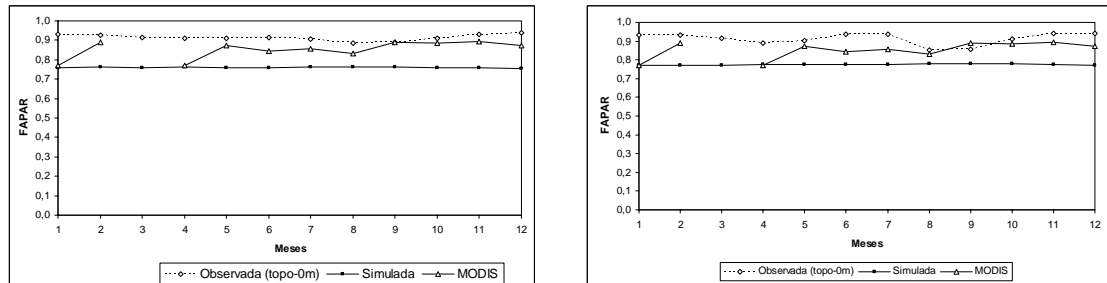
Figura 19. Média mensal da FAPAR estimada pelo MODIS e do seu índice de qualidade (IQ).

3.4. Comparação Entre Estimativas da FAPAR Baseadas em Medições de Campo, Modelagem e Sensoriamento Remoto

A Figura 20a mostra a FAPAR observada, simulada e estimada pelo MODIS considerando todo o dia enquanto a Figura 20b considera apenas as 10:30 hora local. Os maiores valores são os estimados por medições de campo (com exceção da FAPAR média observada às 10:30 h em setembro que foi menor que a estimada pelo MODIS devido ao efeito da clareira), seguidos pelas estimativas do MODIS. Os valores simulados pelo IBIS são inferiores às demais estimativas.

Mudanças nas condições atmosféricas como aerossóis e presença de nuvens afetam a FAPAR. Outra razão que causa as diferenças entre os resultados é que o algoritmo do MODIS determina a FAPAR instantaneamente e apenas pela contribuição das folhas,

enquanto as observações de campo e as simulações do IBIS incluem também a PAR absorvida pelos galhos e os valores são horários.



(a) Todo o dia

(b) Às 10:30 h

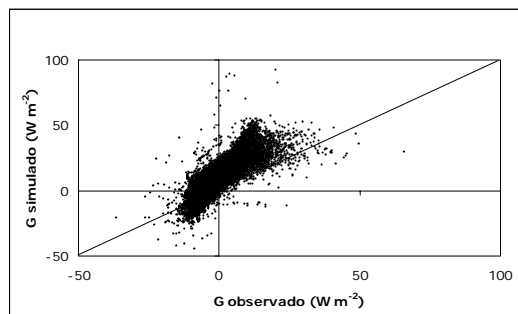
Figura 20. Média mensal da FAPAR observada, simulada pelo IBIS e estimada pelo MODIS (a) durante todo o dia e (b) às 10:30 hora local.

Tian et al. (2004) compararam a FAPAR obtida pelo CLM e pelo MODIS para o ano de 2001 sobre várias regiões, inclusive a Amazônia. A Tabela 3 mostra os valores médios anuais da FAPAR encontrados neste estudo para todo o dia e às 10:30 h, e por Tian et al. (2004). Os valores da FAPAR encontrados às 10:30 h foram ligeiramente superiores do que considerando todo o dia. A FAPAR estimada pelo MODIS às 10:30 h foi a mesma nos dois estudos, enquanto a estimada por ambos os modelos foi inferior à estimada por sensoriamento remoto.

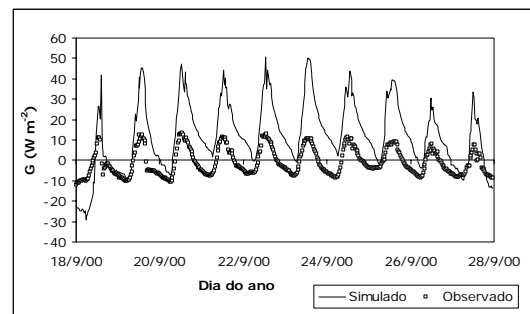
A pouca absorção de radiação no IBIS pode ser a responsável pela superestimativa do fluxo de calor no solo (G) (Figura 21). Delire e Foley (1999), quando testaram a performance do IBIS no ecossistema de floresta tropical da Reserva Florestal Jaru, também notaram que a amplitude do G foi superestimada.

Tabela 3. Comparação dos valores médios anuais da FAPAR encontrados nesse estudo para todo o dia e às 10:30 h com os encontrados por Tian et al. (2004).

	FAPAR		
	Todo o dia	Às 10:30 h	
	Este estudo	Este estudo	Tian et al. (2004)
Medições de Campo	0,91	0,93	—
Modelagem	0,76 (IBIS)	0,77 (IBIS)	0,83 (CLM)
MODIS	—	0,85	0,85



(a)



(b)

Figura 21. (a) Fluxo de calor no solo (G) observado versus simulado para todo o período de dados disponível para o km 83 e (b) Comportamento do G observado e simulado no km 83 para o período de 18 a 28 de setembro de 2000.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram feitas comparações dos valores da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela floresta tropical Amazônica (FAPAR) estimados com base em medições de campo, modelagem e sensoriamento remoto. Após a análise dos resultados, conclui-se que:

- Os valores médios da FAPAR encontrados para todo o dia foram 0,91 e 0,76 para medições de campo e modelagem, enquanto às 10:30 h foram 0,93, 0,77 e 0,85, para medições de campo, modelagem e sensoriamento remoto, respectivamente;
- Os valores obtidos via modelagem (IBIS) deixaram a desejar, pois são consideravelmente inferiores aos demais, mas concordam com os obtidos pelo modelo CLM (Tian et al., 2004). Provavelmente são necessárias algumas melhorias no código do modelo para que a amplitude da absorção da PAR pelo dossel da floresta seja melhor representada;

- As estimativas da FAPAR via sensoriamento remoto (MODIS) são satisfatórias e ligeiramente inferiores aos observados no campo (já que consideram apenas as folhas) e concordam com os resultados de Tian et al. (2004). A maioria dos dados foi obtida através do algoritmo secundário devido à ocorrência de nebulosidade sobre a região, afetando consideravelmente a qualidade desses dados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anhuf, D. e Rollenbeck, R. Canopy structure of the Rio Surumoni rain forest (Venezuela) and its influence on microclimate. *Ecotropica*, 7: 21-32, 2001.
- Cohen, W. B. e Justice, C. O. Validating MODIS terrestrial ecology products: linking in situ and satellite measurements. *Remote Sens. Environ.*, 70: 1-3, 1999.
- Delire, C. e Foley, J. A. Evaluating the performance of a land surface/ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. *J. Geophys. Res.*, 104: 16895-16909, 1999.
- Foley, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S. e Haxeltine, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochem. Cycles*, 10: 603-628, 1996.
- Friend, A. D. Parameterisation of a global daily weather generator for terrestrial ecosystem modeling. *Ecological Modelling*, 109 (2): 121-140, 1998.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J. e 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.
- Januário, M., Viswanadham, Y. e Senna, R. C. Radiação solar total dentro e fora de floresta tropical úmida de terra firme (Tucuruí, Pará). *Acta Amazônica*, 22 (3): 335-340, 1992.
- Knyazikhin, Y., Glassy, J., Privette, J. L., Tian, Y., Lotsch, A., Zhang, Y., Wang, Y., Morisette, J. T., Votava, P., Myneni, R. B., Nemani, R. R. e Running, S. W. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15) algorithm theoretical basis document, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>, 1999.

- Kucharik, C. J., Foley, J. A., Delire, C., Fisher, V. A., Coe, M. T., Lenters, J. D., Young-Molling, C. e Ramankutty, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochem. Cycles*, 14: 795-825, 2000.
- Mariscal, M. J., Orgaz, F. e Villalobos, F. J. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agric. For. Meteorol.*, 100: 183-197, 2000.
- Myneni, R. B. e Williams, D. L. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.*, 49: 200-211, 1994.
- Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G. R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J. T., Votava, P., Nemani, R. R. e Running, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 83: 214-231, 2002.
- Nikolov, N. T. e Zeller, K. F. A solar radiation algorithm for ecosystem dynamic models. *Ecological Modelling*, 61: 149-168, 1992.
- Nouvellon, Y., Bégué, A., Moran, M. S., Seen, D. L., Rambal, S., Luquet, D., Chehbouni, G. e Inoue, Y. PAR extinction in shortgrass ecosystems: effects of clumping, sky conditions and soil albedo. *Agric. For. Meteorol.*, 105: 21-41, 2000.
- Privette, J. L., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Mukelabai, M., Roberts, G., Tian, Y., Wang, Y. e Leblanc, S. G. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. *Remote Sens. Environ.*, 83: 232-243, 2002.
- Rocha, H. R., Goulden, M. L., Miller, S. D., Menton, M. C., Pinto, L. D. V. O., Freitas, H. C. e Figueira, A. M. S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, no prelo, aceito para publicação em 2004.
- Running, S. W., Justice, C. O., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufmann, Y. J., Strahler, A. H., Huete, A. R., Muller, J. P., Vanderbilt, V., Wan, Z. M., Teillet, P. e Carneggie, D. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *Int. J. Remote Sens.*, 15: 3587-3620, 1994.
- Running, S. W., Baldocchi, D. D., Turner, D. P, Gower, S. T., Bakwin, P. S. e Hibbard, K. A. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sens. Environ.*, 70: 108-127, 1999.
- 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., Huttyra, L., Keller, M., Kirchhoff, V., Menton, M., Munger, J. W., Pyle, E. H., Rice, A. H. e Silva, H. Carbon in amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance – induced losses. *Science*, 302: 1554-1557, 2003.

- Shabanov, N. V., Wang, Y., Buermann, W., Dong, J., Hoffman, S., Smith, G. R., Tian, Y., Knyazikhin, Y. e Myneni, R. B. Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sens. Environ.*, 85: 410-423, 2003.
- Tian, Y., Dickinson, R. E., Zhou, L., Zeng, X., Dai, Y., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Zhang, X., Friedl, M., Yu, H., Wu, W. e Shaikh, M. Comparison of seasonal and spatial variations of LAI/FPAR from MODIS and common land model. *J. Geophys. Res.*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, No. D1, D01103 10.1029/2003JD003777, 2004.
- Williams, M., Malhi, Y., Nobre, A. D., Rastetter, E. B., Grace, J. e Pereira, M. G. P. Seasonal variation in net carbon exchange and evapotranspiration in a Brazilian rain forest: a modeling analysis. *Plant, Cell and Environ.*, 21: 953-968, 1998.
- Yang, W., Stroeve, J. C., Huang, D., Shabanov, N. V., Knyazikhin, Y. e Myneni, R. B. Analysis of MODIS LAI and FPAR collections 1 and 3 data set time series from July 2000 to December 2002. *Remote Sens. Environ.*, no prelo, aceito para publicação em 2003.