

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA – UNIR  
NÚCLEO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO  
REGIONAL E MEIO AMBIENTE – PGDRA  
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO REGIONAL E MEIO AMBIENTE

APLICAÇÃO DO MODELO SIB2 NA COMPOSIÇÃO DE FLUXOS DE SUPERFÍCIE  
OBSERVADOS E MODELADOS EM ÁREAS DE FLORESTA E PASTAGEM NA  
AMAZÔNIA

LENILSON SERGIO CANDIDO

Porto Velho (RO)

2008

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA**  
**Núcleo de Ciências e Tecnologia**

APLICAÇÃO DO MODELO SIB2 NA COMPOSIÇÃO DE FLUXOS DE SUPERFÍCIE  
OBSERVADOS E MODELADOS EM ÁREAS DE FLORESTA E PASTAGEM NA  
AMAZÔNIA

LENILSON SERGIO CANDIDO

Orientador Prof Dr. Antônio Ocimar Manzi

Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente (PGDRA) da Universidade Federal de Rondônia, dentro da linha de pesquisa Monitoramento ambiental, para obtenção do título de mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente.

Porto Velho (RO)

2008

Candido, Lenilson Sergio  
C217a Aplicação de modelo de Sib2 na composição de fluxos de superfície  
2008 observados e modelados em áreas de floresta e pastagem na amazônia /  
Lenilson Sergio Candido ; orientador, Antonio Ocimar Onzi. -- Porto  
Velho, 2008.  
xvii, 47f. : Il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Rondônia.  
Referências

1. Modelagem matemática. 2. Monitoramento ambiental – Amazônia. 3.  
Modelagem climática. 4. Ecossistema – Modelos matemáticos. I.  
Candido, Lenilson Sergio. II. Universidade Federal de Rondônia. III. Título

CDU 51:502(811)

Comissão Examinadora

---

Prof Dr. Antônio Ocimar Manzi  
(Orientador)

---

Prof Dr. Júlio Sancho Linhares Teixeira Militão

---

Prof Dr. Wanderley Rodrigues Bastos

---

Lenilson Sergio Candido

Porto Velho, 09 de Dezembro de 2008

Resultado

---

Aos meus pais, Lourenço Candido da Silva (*in memoriam*) e Maria Margarida Pedrosa da Silva, pois são eles os principais responsáveis pela minha caminhada, mostrando sempre o lado da esperança e força de vontade que precisamos ter para alcançarmos nossos objetivos.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

- Ao meu Deus, sempre fiel, que me segurou e me deu forças todos os dias para cumprir este trabalho.
- Aos meus pais pela responsabilidade de mim colar na vida e mostrar o caminho que se deve sempre seguir
- As minhas filhas Laíse e Lívia que são a minha inspiração.
- A Todos meus Irmãos Sandra, Cileide, Rildo, Lourenço, Jason e Arlon e especialmente ao meu irmão Luiz, que me empurrou sempre para frente nesta jornada.
- A minha esposa Gisera, a Nicolý e Luana pela força e compreensão.
- À Universidade Federal de Rondônia, em especial ao Departamento de Matemática, pela oportunidade de realização deste trabalho.
- Aos colegas do Ana Fanny, Ângela, Aparecida, Fernando, Marcos Marlos e Ricardo, pelo apoio e compreensão durante este trabalho.
- Ao projeto LBA (Manaus e Ji-Paraná) pelo apoio nas pesquisas.
- Ao Instituto Nacional de Pesquisa do Amazonas INPA, por disponibilizar seus pesquisadores para realização deste trabalho.
- Ao prof. Dr. Luiz Antônio Candido, por sua presença amiga, e por seu esforço para a realização deste curso de mestrado.
- Ao prof. Dr. Antônio Ocimar Manzi, por seu apoio, orientação e confiança depositada no desenvolvimento desta dissertação.
- Aos colegas do curso de mestrado, em especial aos que mais conviveram e batalharam comigo durante o curso, Antônio Furtado, Gleimíria, Gean Carla e Lediane, obrigado
- A minha colega do Departamento de Física Prof<sup>a</sup> Dr. Laudileni Olenka pela colaboração durante este trabalho
- A todos que de alguma forma colaboraram e que não mencionei nominalmente.
- Muito obrigado a todos

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS -----	ix
LISTA DE TABELAS-----	xii
LISTA DE SÍMBOLOS-----	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS -----	xvi
RESUMO -----	xvii
ABSTRACT-----	xviii
1. INTRODUÇÃO -----	1
1.1. Objetivos-----	5
1.1.1. Objetivo Geral-----	5
1.1.2. Objetivos específicos-----	5
2. MATERIAIS E MÉTODOS-----	6
2.1. Sítios Experimentais-----	6
2.1.1. Descrição do sítio de Floresta-----	6
2.1.2. Descrição do sítio de pastagem-----	6
2.1.3. Dados-----	7
2.1.4 Controle de qualidade e estatística de falhas -----	9
2.1.5 Preenchimento das falhas nos dados-----	10
2.1.6. Filtragem dos dados de fluxos turbulentos-----	11
2.2. Modelo de Biosfera-----	11
2.3. Representação dos ecossistemas de floresta e pastagem-----	17
2.4 .Simulações numéricas-----	18
3 . RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	19
3.1. Análise Observacional-----	19
3.1.1. Reserva Biológica do Jaru-----	19
3.1.2. Fazenda Nossa Senhora-----	20
3.1.3. Variáveis Climatológicas-----	21
3.2 Simulações com o modelo SiB2-----	28
3.2.1 Umidade do solo-----	29
3.2.2 Comportamento estacional dos fluxos de calor latente, sensível e gás carbonico-----	31

3.2.3 Análise dos ciclos sazonais-----	38
3.2.4Análise entre os sítios-----	43
5. CONCLUSÕES-----	46
6. REFERÊNCIAS-----	47



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Comparativo de estimativas para o balanço de carbono na Amazonia segundo várias técnicas de medidas.....	3
Figura 2 –	Localização dos sítios experimentais do LBA para as áreas de pastagem (esquerda) e floresta (direita) em Rondônia .....	8
Figura 3 –	Esquema conceitual da parametrização “big leaf” utilizada no modelo SiB2, mostrando as componentes dos processos de superfície em uma área vegetada, onde: (P) precipitação, (I) perda por interceptação, (T) transpiração, (E) evapotranspiração, (R) escoamento total, (LE) fluxo de calor latente, (H) fluxo de calor sensível e (Rn) energia radioativa disponível a superfície.....	13
Figura 4 –	Disponibilidade dos dados em percentual para o Sítio da Reserva Biológica do Jaru, durante o período de 23 de março de 1999 a 14 de novembro de 2002. ....	16
Figura 5 –	Disponibilidade dos dados em percentual para o Sítio da Fazenda Nossa Senhora, durante o período de 05 de fevereiro de 1999 a 03 de novembro de 2002.....	17
Figura 6 –	Valores médios diários de precipitação por estação de 1999 a 2002 para REBIO Jaru e FNS Ouro Preto do Oeste. (a) floresta estação chuvosa, (b) Floresta estação seca, (c) pastagem estação chuvosa e (d) pastagem estação seca. ....	19
Figura 7 –	Representação da média do ciclo diário de temperatura por estação para o período de 1999 a 2002 da REBIO Jaru e FNS Ouro Preto do Oeste. (a) floresta e (b) Floresta. ....	20
Figura8 –	Média do comportamento do Clico diurno de radiação solar	

	incidente ( $S_{in}$ ) e radiação terrestre incidente ( $L_{in}$ ) nas estações chuvosa e seca para o período de 1999 a 2002 para os dois sítios. (a) floresta e (b) pastagem.....	21
Figura9 –	Fluxo de calor sensível(H) e latente(LE) da floresta e pastagem nas estações chuvosa e seca. (a) estação chuvosa floresta, (b) estação chuvosa pastagem (c) estação seca floresta e (d) estação seca pastagem. ....	22
Figura10 –	Fluxo de $CO_2$ nos dois sítios nas estações chuvosa e seca. (a) estação úmida floresta e pastagem e (b) estação seca floresta e pastagem. ....	24
Figura11 –	Ciclos sazonais da precipitação e umidade do solo (unidade volumétrica) na camada de 0 a 4m, calculada pelo modelo e a observação disponível para o sítio de floresta entre janeiro de 2000 e setembro de 2002.....	25
Figura12 –	Ciclos sazonais da precipitação e umidade do solo (unidade volumétrica) na camada de 0 a 2m, calculada pelo modelo e a observação disponível para o sítio de pastagem entre fevereiro de 1999 e janeiro de 2002.....	26
Figura13 –	Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado (Obs) e modelados (Mod) e fluxo de $CO_2$ observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de $CO_2$ simulados ( $FCO_2$ Sim e $ACO_2$ Sim) (c) referente ao sítio de floresta na estação chuvosa de 2001. ....	28
Figura14 –	Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado (Obs) e modelados (Mod) e fluxo de $CO_2$ observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de $CO_2$ simulados ( $FCO_2$ Sim e $ACO_2$ Sim) (c) referente ao sítio de floresta na estação seca de 2001.....	29
Figura15 –	Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado	

	(Obs) e modelados (Mod) e fluxo de CO <sub>2</sub> observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de CO <sub>2</sub> simulados (FCO <sub>2</sub> Sim e ACO <sub>2</sub> Sim) (c) referente ao sítio de pastagem na estação chuvosa de 2001.....	31
Figura16 –	Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado (Obs) e modelados (Mod) e fluxo de CO <sub>2</sub> observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de CO <sub>2</sub> simulados (FCO <sub>2</sub> Sim e ACO <sub>2</sub> Sim) (c) referente ao sítio de pastagem na estação seca de 2000. ....	33
Figura17 –	Variação da média mensal dos fluxos de calor latente e sensível observados e simulados nas condições INI e SW, no sítio de floresta, entre janeiro de 2000 e novembro de 2002.....	35
Figura18 –	Variação da média mensal do fluxo de CO <sub>2</sub> observado e simulado (em $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) nas condições INI e SW, no sítio de floresta, entre janeiro de 2000 e novembro de 2002.....	36
Figura19 –	Variação da média mensal dos fluxos de calor latente e calor sensível observado e simulado (em $\text{W}/\text{m}^2$ ), no sítio de pastagem, entre fevereiro de 1999 e novembro de 2002.....	37
Figura20 –	Variação da média mensal dos fluxos de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ) observados (traço com bola aberta), simulados SW(traço fino) e INI(traço largo), assimilação modelada (tracejado com bola aberta)SW e (pontilhado com bola fechada)INI, respiração do solo observada(traço com quadrado), respiração do ecossistema modelado (traço fino com x), respiração do solo observado mais respiração do ecossistema modelado (traço largo com x) na área de pastagem para o período de fevereiro de 1999 a março de 2002.....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Apresenta a quantidade de dados válidos para a variável (Sin), em intervalos de meia em meia hora em todos os dias do ano de 1999 da torre que se localiza na Fazenda Nossa Senhora em Ouro Preto d'oeste.....	10
Tabela 2 -	Parâmetros descritivos de propriedades estruturais e físicas da vegetação e do solo obtidos nas áreas de floresta e pastagem na Amazônia.....	14
Tabela 3 -	Total de precipitação (mm) por estação na REBIO Jaru e FNS Ouro Preto do Oeste, registrado na coleta de 1999 até 2002.....	18
Tabela 4 -	CORRELAÇÃO e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) dos fluxos entre os fluxos simulados e observados da floresta de 2000 até 2002.....	30
Tabela 5 -	CORRELAÇÃO e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) dos fluxos entre os fluxos simulados e observados da Pastagem no período de 1999 a 2002.....	33

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$	Micrometro – $10^{-6}\text{m}$
$\mathfrak{D}$	Duração do dia em segundos (86400 s)
$\lambda$	Calor latente de vaporização, $\text{J Kg}^{-1}$
$K$	Condutividade hidráulica entre as camadas, $\text{m s}^{-1}$
$\chi$	Ângulo de inclinação médio, associado à perda de água para o aquífero
$\lambda E_C, \lambda E_{GS}$	Fluxo de calor latente, $\text{W m}^{-2}$
$\theta_i$	Umidade volumétrica do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
$K_i$	Condutividade hidráulica na camada i, $\text{m s}^{-1}$
$\psi_i$	Potencial mátrico na camada i, m
$\rho_w$	Massa específica da água, $\text{kg m}^{-3}$
$A$	Capacidade calorífica do solo $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$
$\text{ACO}_2 \text{ Sim}$	Assimilação de $\text{CO}_2$ simulado
$C_C$	Capacidade calorífica, $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$
$D_C, D_G$	Drenagem da água, $\text{m s}^{-1}$
$D_i$	Espessura da $i$ -ésima camada do solo, m
$E$	Evapotranspiração
$e_*(T)$	Pressão de vapor de saturação do vapor d'água à temperatura $T$
$e_A$	Pressão do vapor d'água no nível $h_A$ .
$E_{DC,i}$	Extração de umidade na $i$ -ésima camada por transporte do dossel, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$E_{DG,i}$	Análogo a $E_{DC,i}$ para a cobertura do chão
$em$	Pressão de valor de água
$F_c$	Fluxo de $\text{CO}_2$ - $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
$\text{FCO}_2 \text{ Sim}$	Fluxos de $\text{CO}_2$ simulado
$G_{GS}$	Fluxo de calor no solo, $\text{W m}^{-2}$
$H$	Fluxo de calor sensível

$H_C, H_{GS}$	Fluxo de calor sensível, $W m^{-2}$
$H_{obs}$	Fluxo calor sensível observado
$h_S$	Fator de ajuste da umidade relativa do solo no topo da superfície
$H_{sim}$	Fluxo calor sensível simulado
$I$	Perda por interceptação
$K_C$	Coefficiente de extinção para o dossel
$K_S$	Condutividade hidráulica de saturação do solo
$LE$	Fluxo de calor latente
$LE_{obs}$	Fluxo de calor latente observado
$LE_{sim}$	Fluxo de calor latente simulado
$L_{in}$	Radiação de onda longa incidente
$Mod$	Dados modelados
$NEE$	Troca Líquida de $CO_2$ do ecossistema
$Obs$	Dados observado
$^{\circ}C$	Temperatura em graus Celcius
$^{\circ}K$	Temperatura em graus Kelvin
$P$	Precipitação
$P$	Taxa de precipitação sobre o dossel, $m s^{-1}$ .
$P_1$	Infiltração de precipitação na 1ª camada, $m s^{-1}$
$PAR$ ou $RFA$	Radiação fotossinteticamente ativa
$P_C, P_G$	Interceptação de precipitação, $mm s^{-1}$
$P_O$	Taxa de precipitação efetiva no solo, $m s^{-1}$
$Q_3$	Drenagem gravitacional para o aquífero, $m s^{-1}$
$Q_{i,i+1}$	Fluxo entre a camada $i$ e a $i+1$ , $m s^{-1}$
$Q_{i+1}$	Escoamento entre as camadas $i$ e $i+1$ , $m s^{-1}$
$R$	Escoamento total

REBS	Fluxo de calor no solo
Rn	Saldo de radiação
$Rn_c, Rn_{GS}$	Radiação disponível, $W m^{-2}$
$S_C$	Valor de saturação de $M_C$
$S_{in}$	Radiação solar incidente
T	Transpiração
Tair	Temperatura
u	Velocidade do vento ( $m s^{-1}$ )
u	Velocidade do vento
$W_i$	Grau de saturação da umidade em cada camada

## LISTA DE ABREVIATURAS

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LBA	Programa Experimentos em Grande Escala na Biosfera-Atmosfera da Amazônia
SIB2	“Simple Biosphere” versão 2.0
CEPLAC	Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
ANA	Agência Nacional das Águas
REBIO	Reserva Biológica
FNS	Fazenda Nossa Senhora
ABRACOS	Estudo anglo-brasileiro de observações do clima da Amazônia
RMSE	Raiz Do Erro Quadrático Médio



## RESUMO

Os sistemas de monitoramento dos fluxos de energia e massa entre a superfície e a atmosfera, apesar de serem robustos, sofrem interrupções no sistema de aquisição de dados decorrentes de vários fatores que envolvem aspectos instrumentais e ambientais. Na Amazônia este tipo de sistema tem sido aplicado intensivamente nos últimos anos, buscando monitorar as trocas de propriedades físicas entre a floresta natural e a atmosfera e também de áreas impactadas. Nesse sentido esse presente trabalho avalia a aplicação de uma estratégia de composição de dados meteorológicos observados e um modelo SiB2 (Simple Biosphere Model), que estima fluxos de energia, vapor de água e dióxido de carbono para vários ecossistemas. Os dados meteorológicos e os fluxos foram medidos em dois sítios experimentais, um de floresta e outro de pastagem no suldeste da Amazônia, durante os anos de 1999 a 2002. Os parâmetros utilizados para fazer as simulações dos dois sítios foram pesquisados na literatura. Dois tipos de simulações foram realizados: no primeiro apenas os dados meteorológicos serviram de entrada ao modelo; no segundo a umidade do solo monitorada também foi assimilada pelo modelo. Os resultados dos fluxos de calor latente, calor sensível e de dióxido de carbono simulados foram comparados com as respectivas medidas disponíveis nos dois sítios. Para floresta obteve-se um  $R^2 = 0,95$  e  $(RMSE) = 65,3 \text{ W/m}^2$  para o fluxo de calor latente,  $R^2 = 0,99$  e  $(RMSE) = 52,5 \text{ W/m}^2$  para o fluxo de calor sensível e  $R^2 = 0,89$  e  $(RMSE) = 4,6 \text{ } \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  para o fluxo de dióxido de carbono. Na pastagem foram encontrados os seguintes valores:  $R^2 = 0,98$  e  $(RMSE) = 49,2 \text{ W/m}^2$  para o fluxo de calor latente,  $R^2 = 0,98$  e  $(RMSE) = 16,2 \text{ W/m}^2$  para o fluxo de calor sensível e  $R^2 = 0,93$  e  $(RMSE) = 4,8 \text{ } \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  para o fluxo de dióxido de carbono. O modelo SiB2 capturou a tendência de variação e a magnitude das trocas de energia e de dióxido de carbono entre os ecossistemas e a atmosfera. O modelo mostrou-se útil como ferramenta numérica de preenchimento de falhas de fluxos de energia e dióxido de carbono em particular para área de floresta. Na área de pastagem melhorias na representação física dos processos de respiração do ecossistema podem aprimorar os resultados, particularmente para a troca líquida de gás carbônico.

Palavra Chave: Amazônia, monitoramento, modelo de biosfera, validação dos resultados

## ABSTRACT

Energy and mass flux monitoring systems between surface and atmosphere, even being tough, suffer interruptions at data acquisition by many factors which implicate instrumental and environmental aspects. In the Amazon, this kind of system has been actively applied in the last years, searching to monitor the physical properties change between the natural forest and atmosphere, and also of impacted areas. Leading this way the present work evaluates the application of a meteorological data composition observed at a SiB2 (Simple Biosphere Model), which estimates energy fluxes, water steam and carbon dioxide to many ecosystems. Meteorological data and the fluxes have been measured in two experimental sites, one a forest and the other a pasture in southwest Amazon, from 1999 to 2002. The used parameters to make the two sites simulation were researched at literature. Two kinds of simulations were made: At the first, only the meteorological data served as load to the model; at the second the monitored soil moisture was also assimilated by the model. The latent heat results, sensitive hat and carbon dioxide simulated were compared with the respective measures available at the two sites. To the forest were obtained a  $R^2 = 0,95$  and  $(RMSE) = 65,3 \text{ W/m}^2$  to the latent heat flux,  $R^2 = 0,99$  and  $(RMSE) = 52,5 \text{ W/m}^2$  to sensitive heat flux and  $R^2 = 0,89$  and  $(RMSE) = 7,8 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  to the carbon dioxide flux. The SiB2 model captured the variation tendency and the extent of the energy trades and carbon dioxide between ecosystems and atmosphere. The model showed useful as a numeric tool to fulfill the energy flux and carbon dioxide flows particularly to the forest area. At the pasture area enhancements at the ecosystem breathing physical representation shall give better results, particularly to the liquid exchange of carbonic gas.

Key Words: Amazon, Monitoring, Biosphere model, Results Validation

## 1. INTRODUÇÃO

O ser humano com suas atitudes vem provocando mudanças no meio ambiente de tal modo que produz problemas em escala mundial. As ações antrópicas levaram a comunidade científica a se preocupar com o aumento dos gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gás que tem a propriedade de retenção de calor e que está ajudando a promover o aquecimento do planeta. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Sigla em inglês, IPCC (2007) aponta como principais fontes de emissão do CO<sub>2</sub> os combustíveis fósseis, a produção de cimento, o desmatamento, as queimadas e as mudanças de uso da terra. O desmatamento libera uma quantidade grande de carbono para a atmosfera, da ordem de 1,6 GtC/ano (IPCC, 2007). Diante disso, a floresta Amazônica, com todo o carbono estocado em seu ecossistema, passou a ser vista como uma região de importância no cenário mundial.

A floresta Amazônica é aparentemente uniforme e sempre verde, porém, resultados de medidas ambientais, em áreas distintas de floresta, mostram que mesmo espécies semelhantes de árvores apresentam comportamento bastante variável em termos de fluxos de carbono, água e energia, indicando a existência de um forte controle que depende do ecossistema (ANDREAE *et al.*, 2002). Por exemplo, ao substituir áreas de floresta por pasto induz-se a uma mudança na interação dos ecossistemas com a atmosfera (AVISSAR *et al.*, 2002), tendo em vista que o meio como um todo tenderá a adequar-se a nova condição ambiental. A busca, pelo entendimento do funcionamento do ecossistema amazônico, tem mostrado que o desmatamento promove alterações nos fluxos de água, energia e carbono (AVISSAR *et al.*, 2002; ANDREAE *et al.*, 2002).

Segundo Fearnside., (2006), o desmatamento leva a perdas ambientais que são mais importantes do que o uso pouco sustentável da área desflorestada. Ele destaca os incêndios florestais, a mortalidade das árvores e a liberação dos estoques de carbono como ameaças para o clima.

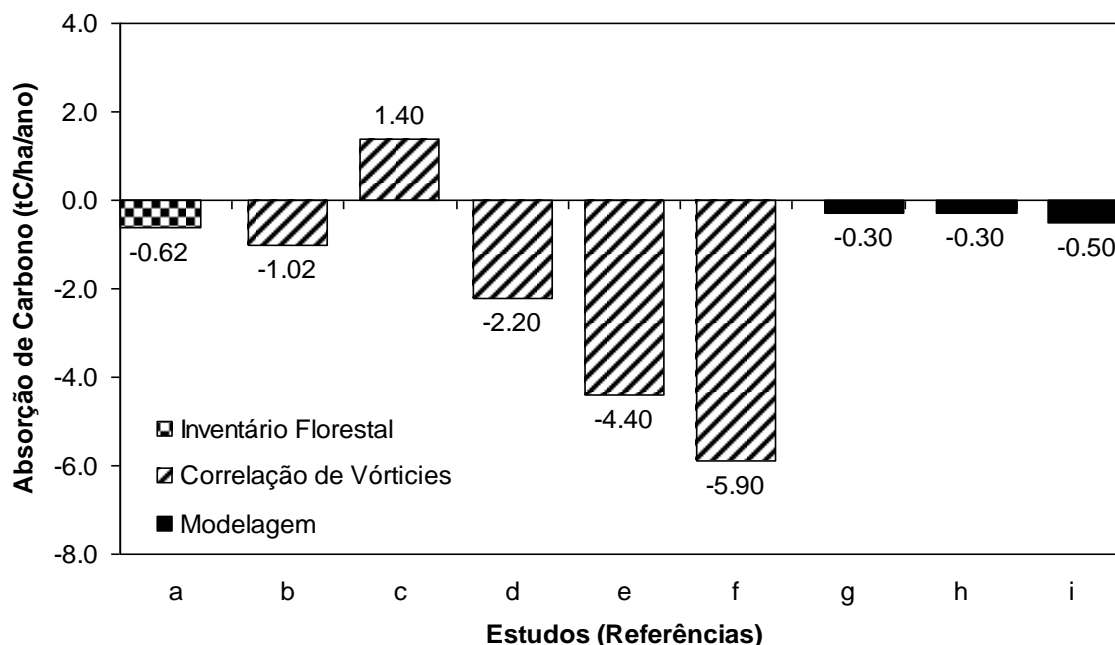
Vários estudos indicam que a floresta desta região está acumulando carbono devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, resultando do chamado efeito de fertilização do CO<sub>2</sub>. O gás dióxido de carbono é um gás de efeito estufa que desempenha papel importante no balanço de energia do sistema biosfera-atmosfera da região. Devido a sua grande extensão, as florestas tropicais úmidas da Amazônia são importantes no ciclo global do carbono, por conterem aproximadamente 40% do C estocado na biomassa terrestre tropical (PHILLIPS *et al.*, 1998). Medidas recentes (GRACE *et al.*, 1996; MALHI *et al.*, 1998; PHILLIPS *et al.*, 1998; ARAÚJO *et al.*, 2002; OMETTO *et al.*, 2005) sugerem que a floresta Amazônica seja um sorvedouro de CO<sub>2</sub>

da atmosfera. Este dado é ainda bastante incerto frente a complexidade associada ao ciclo de carbono local. Entre as dificuldades AGUIAR *et al.*, (2006) cita o número de medidas e a grande variabilidade nos valores de fluxos de CO<sub>2</sub> medidos em cada local de coleta dos dados.

A figura 1 mostra uma comparação de resultados dos estudos de balanço de carbono para Amazônia, utilizando várias técnicas. Alguns indicam a floresta atuando como fonte e outros como sumidouro. Os principais fatores são associados a períodos relativamente curtos de monitoramento; grande variabilidade espacial das medidas de carbono, diferenças nas técnicas de monitoramento ou imperfeições metodológicas. Há vários métodos disponíveis para medir fluxo de carbono, dentre eles podem-se citar os inventários florestais, a covariância de vórtices e a modelagem do ciclo de carbono.

As medidas recentes de fluxos de CO<sub>2</sub> na Região Amazônica, utilizando o método de covariância de vórtices, se mostraram contraditórias quanto às taxas de absorção pela floresta. Grace *et al.* (1995) encontraram uma taxa de 1 tC/ha/ano de absorção para florestas tropicais no sudoeste da Amazônia, enquanto Malhi *et al.* (1998) estimaram uma taxa de absorção de 5,9 tC/ha/ano no centro-oeste e Vourlitis *et al.* (2001) encontraram um sistema quase em equilíbrio no sul da Amazônia. No leste da Amazônia, Saleska *et al.* (2003), observaram que a floresta foi uma fonte líquida de 1,4 tC/ha/ano para a atmosfera. Segundo Phillips *et al.* (1998), a discrepância pode ser o reflexo da limitação espacial e temporal das medidas do método de covariância dos vórtices turbulentos.

A maioria dos estudos indica que em média a floresta Amazônica está acumulando carbono. Contudo, outros estudos mostram considerável variação interanual, isto é particularmente importante nos estudos de modelagem de Tian *et al.* (1998) e Prentice e Lloyd, (1998), em que mostram a floresta agindo com fonte de carbono para a atmosfera em anos anormalmente secos. O futuro da Amazônia dependerá de como a floresta irá responder à fertilização de CO<sub>2</sub> e qual será o padrão de alteração da chuva na região. Por exemplo, Cox *et al.* (2000) sugerem que a alteração do clima global poderá tornar a Amazônia seca, em que a floresta passaria a ser fonte de gás carbônico devido a redução de sua área.



Legenda para o eixo X:

a	Philips <i>et al.</i> , 1998	1975 a 1996 (97 amostras)
b	Grace <i>et al.</i> , 1995	44 dias de 1993 (Jaru – RO)
c	Saleska <i>et al.</i> , 2003	2001 a 2002 (Cuiabá – Santarém)
d	Fan <i>et al.</i> 1990	1 mês de 1987 (Ducke – AM)
e	Aguiar <i>et al.</i> , 2006	ano de 2004 (Jaru – RO)
f	Malhi <i>et al.</i> , 1998	1 ano entre 1995 e 1996 (Cuieiras – AM)
g	Tian <i>et al.</i> 1998	15 anos toda a bacia
h	Prentice <i>et al</i> loyd, 1998	15 anos toda a bacia
i	Chambers <i>et al.</i> , 2001	1 ano a Amazônia Central

Figura 1: Comparativo de estimativas para o balanço de carbono na Amazonia segundo várias técnicas de medidas.

Ainda não se conhece bem os limites de estocagem de biomassa em florestas tropicais úmidas, a partir dos quais se estabelece um equilíbrio dinâmico, onde os ganhos igualam-se as perdas. Para conhecer a associação entre a dinâmica do crescimento deste ecossistema e os limites de estocagem, há a necessidade de monitoramento contínuo e por longo prazo das trocas de carbono entre o ecossistema e a atmosfera.

A redução das incertezas nas estimativas do balanço de carbono na Amazônia exige longas séries de registro de fluxos de carbono aliadas com a amostragem de diversas áreas para dimensionar o padrão e a variabilidade espaço-temporal. O Projeto LBA-Esperimento de Grande Escala da Bisfera-Atmosfera da Amazonia mede, desde 1999, em vários lugares da Amazônia e

com uma estrutura bastante completa de monitoramento do clima e de carbono na Amazônia (ANDREAE *et al.*, 2002). Mesmo assim, vários fatores, entre eles as condições extremas do clima, contribuem para que sensores, equipamentos, sistemas de aquisição, etc. sofram pane, queimem ou se descalibrem, interrompendo e prejudicando a aquisição de informações nos vários sítios experimentais.

Em geral, a porcentagem de falhas na base de dados dos parâmetros climáticos (mais de 60% do período de medidas não apresentam falhas) é menor quando comparada a dos fluxos (como será analisado adiante). Isso indica que a adoção de alternativas, como a modelagem, que se utiliza das informações climáticas com maior porcentagem de disponibilidade, através da composição medidas-estimativas de fluxos, possibilitem uma ampliação da base de dados de fluxos utilizada nos estudos de balanço de carbono na Amazônia. Isso terá impacto direto para o melhor entendimento sobre a contribuição da floresta para o balanço regional de carbono e com a substituição por pasto pode alterá-lo.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), estabelecido no artigo 12 do Protocolo de Quioto, é um instrumento que visa contribuir para o Desenvolvimento Sustentável de países em desenvolvimento, bem como a redução de gases causadores do efeito estufa na atmosfera, associados ao aquecimento global.

O carbono Social permite aumentar os recursos de sustentabilidade nas comunidades, onde o retorno financeiro dos projetos de carbono são revertidos na própria comunidade, o monitoramento se apresenta como metodologia que permite avaliar os avanços e retrocessos dos recursos. A modelagem climática vem como proposta metodológica para garantir a eficiência dos projetos relacionados ao impacto das mudanças climáticas no meio ambiente e os efeitos que as atividades humanas possam ter sobre os diferentes problemas em seu habitat, e avaliar esses efeitos adequadamente.

Desta forma, este trabalho pretende contribuir com uma combinação de bases de dados, utilizando-se variáveis climáticas e a aplicação de um modelo de biosfera que simula os fluxos de calor latente e sensível, mais o fluxo de gás carbônico no nível do ecossistema, gerando uma base de dados de fluxos “reanalizados” de longo termo, cooperando com a redução das incertezas associadas às falhas de aquisição.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Utilizar o modelo SiB2 (“Simple Biosphere model” versão 2.0 – Sellers *et al.*, 1996) para estabelecer uma estratégia de composição de dados observados e modelados de fluxos de energia e dióxido de carbono em áreas de floresta e pastagem da Amazônia na escala de longo prazo, e avaliar seu potencial como método de preenchimento de falhas nos dados de fluxos.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Quantificar a contribuição relativa de áreas de floresta e pastagem nos processos de fixação de carbono, fluxos de água e energia na interface vegetação-atmosfera utilizando medidas de longo-termo;
- Configurar o modelo de biosfera SiB2 para áreas de floresta e pastagem e calcular explicitamente os fluxos de carbono, vapor de água e energia associados a cada tipo de vegetação;
- Verificar a qualidade dos resultados do modelo SiB2 comparando-os com as medidas de fluxo de carbono nas duas áreas de estudo;
- Avaliar o modelo SiB2 como ferramenta para preenchimento de falhas de fluxo de carbono, de vapor de água e energia resultantes de problemas no sistema de aquisição de dados;

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. SÍTIOS EXPERIMENTAIS

#### 2.1.1. Descrição do sítio de Floresta

A região de floresta primária, classificada como Floresta Ombrofila Aberta (CULF *et al.*, 1997) está situada a 80 km de Ji-Paraná (10° 46'S, 61° 55'W: Figura 2 - direita). Possui uma vegetação com características de terra firme, com altura média do dossel da ordem de 35 m. A área é relativamente plana com altitude variando entre 120 e 150 m acima do nível do mar, e o solo é caracterizado como Podzólico vermelho amarelo A moderado de textura média, com granulometria predominante arenosa (88%), com teor de argila e silte aumentando com a profundidade (HODNETT *et al.*, 1996). Esses autores descrevem ainda que o lençol freático chega a 1,2 m da superfície na estação chuvosa. A profundidade das raízes ultrapassa 4,0 m, o índice de área foliar é da ordem de 4,6 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> e a porosidade do solo varia de 0,483 a 0,305 nos primeiros centímetros (WRIGHT *et al.*, 1996).

#### 2.1.2. Descrição do sítio de pastagem

A outra área de estudo situa-se na Fazenda Nossa Senhora (FNS), no município de Ouro Preto d'Oeste – RO, a 50 km de Ji-Paraná (10°45'44"S, 62°21'27" W: Figura 2 - esquerda). Este sítio é caracterizado como planície, tendo cerca de 4 km<sup>2</sup> de área e uma altitude relativa ao nível do mar de 220 m (CULF *et al.*, 1996). O solo é profundo de textura arenosa na superfície, enquanto a fração de argila aumenta nas camadas inferiores. A camada rochosa situa-se abaixo de 7 m de profundidade. A superfície do solo é compactada pelo efeito pastoril, resultando numa densidade do solo maior na superfície (variando entre 1,50-1,55 g/cm<sup>3</sup>) e menor abaixo de 1m (cerca de 1,46 g/cm<sup>3</sup>). Na superfície o solo tem uma cor marrom escuro, mudando para marrom avermelhado com a profundidade. Traços de manganês ocorrem abaixo das profundidades de 2 a 3 m, o que se atribui a variação sazonal do lençol de água. Hodnett *et al.* (1996), classificam o solo como podzol vermelho-amarelo. A floresta desta área foi removida e queimada em 1977. Em seguida, foram cultivados arroz, feijão e mandioca. E quando a produção agrícola na área teve um declínio através da degradação do solo, mudou-se, no início da década de 80, para *Urochloa brizantha* (também conhecida como *Brachiaria brizantha*) (NOBRE *et al.*, 1996). A pastagem foi queimada quatro vezes, sendo a última em 1994. A pastagem é formada principalmente por 99%



de *U. brizantha* e com uma pequena contribuição de *Panicum maximum* e *Urochloa humidicula* amarelo. As raízes da *U. brizantha*, neste sítio, podem atingir uma profundidade de 3m.

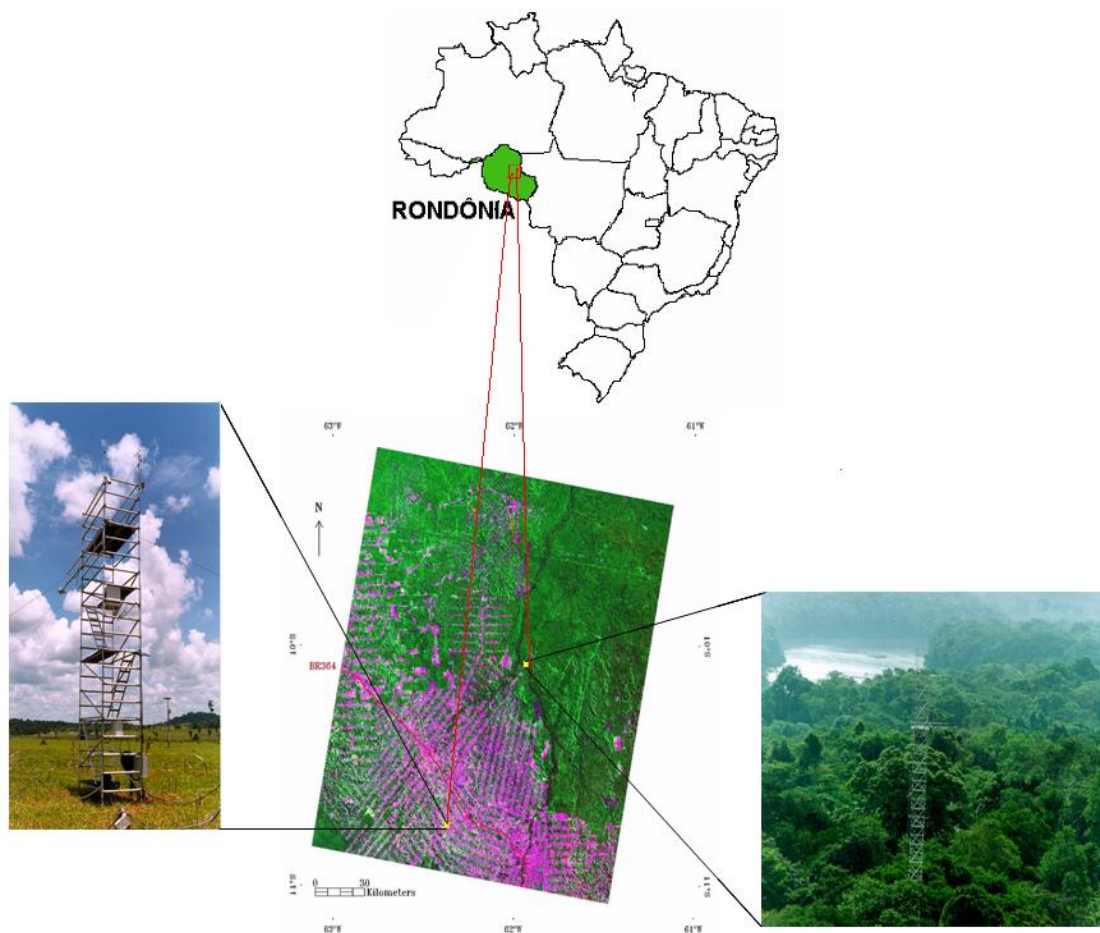


Figura 2: Localização dos sítios experimentais do LBA para as áreas de pastagem (esquerda) e floresta (direita) em Rondônia.

### 2.1.3. Dados

A série de dados usada neste trabalho foi obtida através do sistema de monitoramento das torres do LBA em Rondônia disponível no portal de dados do projeto (<http://beija-flor.cptec.inpe.br>) e que foi publicada por Randow et al. (2004). Esta base de dados abrange o período de 23 de março de 1999 até 14 de novembro de 2002 para a floresta e o período de 05 de fevereiro de 1999 até 03 de novembro de 2002 para pastagem. Esta base inclui dados micrometeorológicos disponíveis em intervalos de 30 minutos no caso dos parâmetros

meteorológicos e de hora em hora para os fluxos turbulentos. Os dados meteorológicos utilizados foram coletados a 60 m de altura para floresta e a 6 m de altura para pastagem.

Os dados de fluxos turbulentos (quantidade de movimento, calor sensível, vapor d'água e dióxido de carbono) foram estimados pelo método de sistema de correlação de vórtices turbulentos, que se baseia no conceito de que o fluxo turbulento de uma determinada grandeza à superfície pode ser calculado através da covariância entre esta grandeza e a componente vertical de velocidade do escoamento, cuja aquisição foi de 10 Hz. Os sensores foram anemômetro sônico 3D (Solent 1012R2, Gill Instruments, UK), analisador de gás infra-vermelho CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (LI-COR, Li6262). Foram utilizados basicamente o fluxo de calor sensível (H); fluxo de calor latente (LE); a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) ou fluxo de CO<sub>2</sub> (F<sub>C</sub>).

Dados de hidrologia do solo, mais especificadamente de conteúdo volumétrico de água do solo, também foram usados. Estas informações foram obtidas semanalmente a partir do final de 1999 até final de 2002. Os dados de conteúdo de água no solo foram obtidos através de sonda de neutrons até 3,5m de profundidade em intervalos de 20cm de profundidade. Nos dois sítios, o LBA possui torres micrometeorológicas equipadas com vários instrumentos (sensores) medindo irradiância solar global (incidente e refletida, LiCor 200X); saldo de radiação (Kipp Zonen Lite); Radiação fotossinteticamente ativa PAR (Quantum LI-COR, LI-190SZ); precipitação (pluviômetro Tipping Bucket Rain Gauge modelo 6011-A, Qualimetrics); velocidade e direção do vento (anemômetros de copo Vector A100R); direção do vento (Vector W200P); temperatura e umidade do ar (Campbell HMP45); fluxo de calor no solo (REBS); pressão atmosférica a superfície (Barometer Vaisala, PTB100A). A aquisição de dados foi realizada com “datalogger” Campbell CR10X armazenando médias a cada 30 min, variância, valores máximos e mínimos. Maiores detalhes dos sítios experimentais e seus equipamentos podem ser encontrados em Randow *et al.*,(2004).

Para as simulações o modelo SiB2 foram utilizadas as seguintes variáveis de entrada: radiação solar incidente ( $S_{in}$ ); radiação de onda longa incidente ( $L_{in}$ ); pressão de vapor de água do ar ( $e$ ); velocidade horizontal do vento ( $u$ ); precipitação ( $P$ ) e temperatura do ar ( $T_{air}$ ), enquanto as demais, quando disponíveis, foram usadas para verificar a destreza do modelo ou foram assimiladas durante a integração.

#### **2.1.4 Controle de qualidade e estatística de falhas**

O sistema de coleta de dados nas torres apresenta vários tipos de erros, que derivam do funcionamento impróprio dos equipamentos, como por exemplo, queda de energia, leituras

erradas, manutenção, descalibração dos instrumentos, ruídos, interferências, descargas elétricas entre outros fatores.

Todo o conjunto de dados obtidos pelos sistemas de monitoramento nas torres do LBA, foi convertido para um formato que atendesse as necessidades do modelo SiB2. Logo após, foi desenvolvido um pré-processamento básico, uma varredura preliminar visando localizar falhas de dados, onde substituiu-se o dado não registrado (em branco) pelo valor -9999, a fim de facilitar a localização dos mesmos através da construção de gráficos de linha do banco de dados de cada variável em estudo. A partir deste ponto foi criado um algoritmo em FORTRAN, algoritmo esse que localizou todos os valores -9999 os identificou como erros de dados e processou uma tabela, apontando todos os valores válidos para cada dia conforme exemplo da Tabela 1.

Tabela 1: Apresenta a quantidade de dados válidos para a variável (Sin), em intervalos de meia em meia hora em todos os dias do ano de 1999 da torre que se localiza na Fazenda Nossa Senhora em Ouro Preto d'oeste.

M/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	8	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	46	48	48	48	48	48	48	48	
3	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
4	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
5	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
6	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
7	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
8	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
9	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
10	48	48	31	25	48	48	18	0	0	37	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	
11	48	48	48	47	48	48	48	48	48	48	21	0	2	48	48	48	48	48	48	48	48	34	15	48	48	48	48	48	48	48	
12	48	23	0	18	48	48	48	48	48	19	14	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	

Este procedimento foi desenvolvido para todas as variáveis que foram preparadas para configurar os dados de entrada do modelo, contribuindo assim para uma melhor visualização das falhas e uma posterior análise destes dados. No sentido de melhorar uma análise observacional foram corrigidas algumas falhas onde foi possível estabelecer um padrão de comportamento da variável, como, por exemplo, a radiação solar incidente no período noturno e a utilização da média aritmética nas pequenas falhas que a elas admitiam.

### 2.1.5 Preenchimento das falhas nos dados

Longos períodos de falhas foram encontrados nas séries de dados de fluxos coletados nos dois sítios, onde dos três anos analisados apenas de 10% a 40% das séries contém informações ininterruptas num período de 24h. Por outro lado, as séries de dados das variáveis climáticas,

necessárias ao modelo SiB2, também sofreram falhas nesse período, com grande frequência de interrupções de curto prazo. Desta forma, houve a necessidade de se proceder uma estratégia de composição das informações climáticas das torres com outras bases de coletas de dados nestes intervalos de tempo. Para preencher estas lacunas foram utilizadas as informações coletadas nas áreas próximas às torres através de sistemas como Plataforma de Coleta de Dados (PCD) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e estações hidroclimatológicas da ANA (Agencia Nacional de Águas).

Para a estruturação do arquivo de entrada no modelo SiB2 as forçantes atmosféricas observadas passaram por um procedimento de preenchimento de todas as falhas para o período estudado, de acordo com os procedimentos a seguir: foi localizada uma base observacional próxima a torre da pastagem, o posto meteorológico da CEPLAC a  $10^{\circ}44'30''\text{S}$  e  $62^{\circ}12'30''\text{W}$  instalado no município de Ouro preto D' Oeste – RO. Apartir das variáveis climatológicas disponíveis no período de 02 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2002, usou-se os dados de temperatura mínima e máxima diárias observadas para obtenção dos valores horários. Para isso foi aplicado um algoritmo baseado na metodologia de Roriz (2006).

Do mesmo posto da CEPLAC utilizou-se a precipitação total diária. A obtenção dos totais horários de chuva foi baseada no processo de desagregação temporal, utilizando-se a curva de distribuição horária da chuva média do período, possibilitando assim a adequação dos totais diários de chuva disponíveis para os totais horários, como pede o modelo. Para as pequenas falhas nas variáveis fez-se a média aritmética dos dados vizinhos. Falhas maiores e dados inconsistentes foram substituídos por dados disponíveis no LBA-MIP (*driver data gap filling algorithms*). No caso da floresta, procedimentos de combinação de medidas de sensores da mesma variável também foram aplicados.

### **2.1.6. Filtragem dos dados de fluxos turbulentos**

Para as variáveis de fluxos turbulentos foi desenvolvido um trabalho de análise inicial, selecionando-se dados válidos ao longo dos anos de 1999 até 2002 para os dois sítios dos seguintes períodos: estação chuvosa de 01 de janeiro até 31 de março; estação seca de 01 de julho a 30 de setembro. A análise estatística indicou a frequência de ocorrência de falhas (com mês, dia e hora) e a identificação de dias com dados sem falhas para cada estação.

## 2.2. MODELO DE BIOSFERA

O modelo de biosfera SiB2 (“Simple Biosphere model” versão 2.0 – Sellers *et al.*, 1996) é utilizado na estimativa dos fluxos de vapor d’água, energia e gás carbônico entre os dois ecossistemas em estudo e a atmosfera. O modelo segue a aproximação “*big leaf*”, que calcula os processos associados aos balanços de energia, água e CO<sub>2</sub> à superfície, integrados para todo o ecossistema, conforme ilustrado na figura 3. O SiB2 incorpora uma descrição explícita do processo de fotossíntese que simula a transferência de CO<sub>2</sub> e vapor d’água entre a vegetação e a atmosfera. A determinação dos fluxos segue a analogia de um circuito elétrico, onde o fluxo é diretamente proporcional a razão entre uma diferença de potencial e uma resistência. As resistências aerodinâmicas estão associadas à transferência turbulenta de massa e energia, enquanto que as resistências de superfície controlam os fluxos (água e CO<sub>2</sub>) entre os tecidos da folhagem e a atmosfera. O modelo utiliza como “input” (dados de entrada) medidas de radiação de ondas curtas incidente (W/m<sup>2</sup>); radiação de ondas longas da atmosfera (W/m<sup>2</sup>); precipitação (mm); temperatura do ar (K); velocidade horizontal do vento (m/s); pressão atmosférica (mb) e umidade específica do ar (kg/kg), medidos no topo da torre dos dois ecossistemas. Nesse trabalho, o SiB2 é desacoplado da componente atmosférica e utiliza como dados de entrada as medidas micrometeorológicas obtidas nos sítios de floresta e pastagem ao longo do período de fevereiro de 1999 a dezembro de 2002.

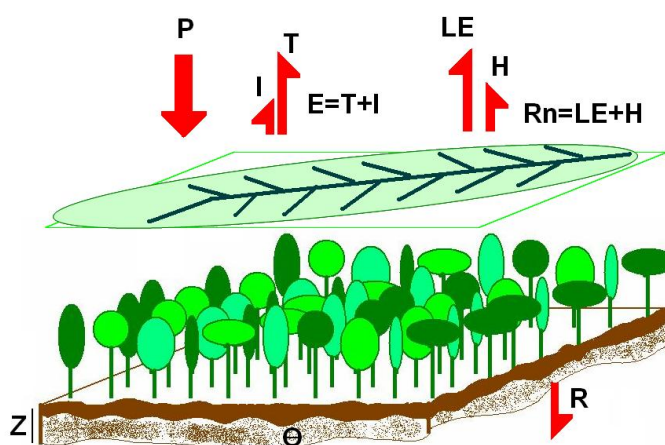


Figura 3: Esquema conceitual da parametrização “*big leaf*” utilizada no modelo SiB2, mostrando as componentes dos processos de superfície em uma área vegetada, onde: (P) precipitação, (I) perda por interceptação, (T) transpiração, (E) evapotranspiração, (R) escoamento total, (LE) fluxo de calor latente, (H) fluxo de calor sensível e (Rn) energia radiativa disponível a superfície.

FONTE: Cedido gentilmente por Luiz Candido, 2008

As equações prognósticas de temperatura são dadas pelas relações:

$$C_C \frac{\partial T_C}{\partial t} = Rn_C - H_C - \lambda E_C , \quad 11$$

$$C_{GS} \frac{\partial T_{GS}}{\partial t} = Rn_{GS} - H_{GS} - \lambda E_{GS} - G_{GS} , \quad 12$$

$$A \frac{\partial T_D}{\partial t} = 2 \left[ Rn_{GS} - H_{GS} - \lambda E_{GS} - G_{GS} \right] \left( \frac{65 \pi}{4} \right)^{1/2} \quad 13$$

onde:

$Rn_C, Rn_{GS}$  : radiação disponível,  $W m^{-2}$ ;

$H_C, H_{GS}$  : fluxo de calor sensível,  $W m^{-2}$ ;

$\lambda E_C, \lambda E_{GS}$  : fluxo de calor latente,  $W m^{-2}$ ;

$G_{GS}$  : fluxo de calor no solo,  $W m^{-2}$ ;

$C_C, C_{GS}$  : capacidade calorífica,  $J m^{-2} K^{-1}$ ;

$\lambda$  : calor latente de vaporização,  $J Kg^{-1}$ ;

$A$  : capacidade calorífica do solo,  $J m^{-2} K^{-1}$ .

A evapotranspiração do dossel,  $E_C$ , divide-se na evaporação da fração molhada pela chuva das folhas do dossel (também chamada de perda por interceptação),  $E_{WC}$ , e na transpiração da parte seca das folhas proveniente da extração de água do sistema radicular,  $E_{DC}$ . Na cobertura e na superfície do solo, a evapotranspiração é a soma de  $E_{WG}$  e  $E_{DG}$  (análogos de  $E_{WC}$  e  $E_{DC}$ ), mais a evaporação direta do solo nú,  $E_S$ . As equações prognósticas dos termos de armazenamento de água por interceptação da precipitação são dadas pelas seguintes relações:

$$\frac{\partial M_C}{\partial t} = P_C - D_C - E_{WC} / \rho_w , \quad 14$$

$$\frac{\partial M_G}{\partial t} = P_G - D_G - E_{WG} / \rho_w , \quad 15$$

onde:

$P_C, P_G$  : interceptação de precipitação,  $mm s^{-1}$ ;

$D_C, D_G$  : drenagem da água,  $m s^{-1}$ ;

$\rho_w$  : massa específica da água,  $\text{kg m}^{-3}$ .

Para o prognóstico da umidade do solo em cada camada, supõe-se o balanço hídrico de forma que:

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_1} \left[ P_1 - Q_{1,2} - \frac{1}{\rho_w} \left( \epsilon_s + E_{DC,1} + E_{DG,1} \right) \right], \quad 16$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_2} \left[ Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{1}{\rho_w} \left( \epsilon_{DC,2} + E_{DG,2} \right) \right], \quad 17$$

$$\frac{\partial W_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_3} \left[ Q_{2,3} - Q_3 \right], \quad 18$$

onde:

$W_i$  : grau de saturação da umidade em cada

camada =  $\theta_i / \theta_s$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;

$\theta_i$  : umidade volumétrica do solo,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;

$D_i$  : espessura da  $i$ -ésima camada do solo, m;

$Q_{i+1}$  : escoamento entre as camadas  $i$  e  $i+1$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$Q_3$  : drenagem gravitacional para o aquífero,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$E_{DC,i}$  : extração de umidade na  $i$ -ésima camada por transporte do dossel,  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;

$E_{DG,i}$  : análogo a  $E_{DC,i}$  para a cobertura do chão;

$P_I$  : infiltração de precipitação na 1ª camada,  $\text{m s}^{-1}$ ;

= mínimo ( $P_O, K_S$ ), se  $W_I < 1$ ,

= 0, se  $W_I = 1$ ;

$K_S$  : condutividade hidráulica de saturação do solo,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$P_O$  : taxa de precipitação efetiva no solo,  $\text{m s}^{-1}$ ,

=  $P - (P_C + P_G) + (D_C + D_G)$ ;

$P$  : taxa de precipitação sobre o dossel,  $\text{m s}^{-1}$ .

### Fluxos de Calor Sensível

Supondo que o armazenamento de calor ou umidade nos nós do circuito das resistências idealizadas seja nulo, o fluxo total de calor sensível do dossel e da superfície é dado por:

$$H = \rho C_p \left[ \frac{G_{GS} - T_A}{r_D} + \frac{2(C_C - T_A)}{r_B} + \frac{C_A - T_R}{r_A} \right], \quad 19$$

Sellers et al. (1986) mostram detalhadamente as relações para a obtenção das resistências usadas na equação anterior.

O fluxo de calor sensível no solo,  $G_{GS}$ , é definido supondo-se o solo como uma camada homogênea e isotérmica de temperatura  $T_D$ , associada ao solo profundo, de capacidade calorífica variável com a quantidade total de umidade integrada no perfil, obtendo-se:

$$G_{GS} = \frac{2\pi A}{\mathfrak{S}} (G_{GS} - T_D) \quad 20$$

onde  $\mathfrak{S}$  é a duração do dia em segundos (86400 s).

#### Evaporação e Interceptação da Precipitação

A interceptação da precipitação pela vegetação é determinada por um modelo do tipo de atenuação da radiação exponencial num fluxo vertical. As taxas de interceptação ( $\text{mm s}^{-1}$ ),  $P_C$ , e da drenagem,  $D_C$ , no dossel são dadas pelas equações:

$$P_C = P \left[ 1 - \exp(-K_C L_{TC} \bar{Y}_C) \right], \quad 21$$

$$D_C = \begin{cases} 0, & \text{se } M_C < S_C \\ P_C, & \text{se } M_C = S_C \end{cases} \quad 22$$

onde  $K_C$  é o coeficiente de extinção para o dossel, e  $S_C$  é o valor de saturação de  $M_C$ .

Analogamente para a cobertura do chão, têm-se:

$$P_G = (P - P_C + D_C) \left[ 1 - \exp(-K_G L_{TG} \bar{Y}_G) \right], \quad 23$$

$$D_G = \begin{cases} 0, & \text{se } M_G < S_G \\ P_G, & \text{se } M_G = S_G \end{cases}, \quad 24$$



onde as variáveis  $P_G$ ,  $D_G$ ,  $K_G$ ,  $M_G$  e  $S_G$  são as correspondentes às com índice c, para a cobertura do chão.

A taxa de precipitação efetiva na superfície do solo,  $P_O$ , torna-se:

$$P_O = P - (P_C + P_G) + (D_C + D_G) \quad 25$$

O cálculo das transferências descrito nas equações anteriores é feito no início do passo de tempo, proporcionando o cálculo de  $M_C$  e  $M_G$  antecipadamente aos cálculos do balanço de energia. A esses valores associam-se as frações de áreas molhadas nas folhas do dossel,  $W_C$ , e da cobertura do chão,  $W_G$ , que têm resistência nula à evaporação, sendo definidas por:

$$W_C = \begin{cases} M_C/S_C, 0 \leq W_C \leq 1, see_*(T_C) > e_A \\ 1, see_*(T_C) < e_A \end{cases}, \quad 26$$

$$W_G = \begin{cases} M_G/S_G, 0 \leq W_G \leq 1, see_*(T_{GS}) > e_A \\ 1, see_*(T_{GS}) < e_A \end{cases} \quad 27$$

onde  $e_*(T)$  é a pressão de vapor de saturação do vapor d'água à temperatura  $T$ , e  $e_A$  é a pressão do vapor d'água no nível  $h_A$ .

O fluxo total de calor latente,  $\lambda E$ , associado à evapotranspiração no dossel e na cobertura do chão é calculado por:

$$\begin{aligned} \lambda E = & \frac{\rho C_P}{\gamma} \left[ \left( \frac{W_G}{r_D} + \frac{1-W_G}{r_D+r_G} \right) + \right. \\ & \left. \frac{\left( -V_G \right) \overline{h_S}}{r_{SURF} + r_D} \right] + \left[ \left( \frac{W_C}{r_B} + \frac{1-W_C}{r_C+r_B} \right) + \right. \\ & \left. + \left[ e_A - e_R \frac{1}{r_A} \right] \right], \quad 28 \end{aligned}$$

onde  $h_s$  é um fator de ajuste da umidade relativa do solo no topo da superfície.

Na equação anterior os termos (I) estão associados às zonas molhadas das folhas, representando perdas para a atmosfera através de interceptação da vegetação; os termos (II) correspondem às áreas secas das folhas que transpiram propriamente dizendo por auto-regulação das plantas, em série com a turbulência no interior do dossel; os termos (III) referem-se à evaporação direta proveniente do solo nú; e os termos (IV) correspondem à evapotranspiração que ocorre entre o espaço interior de ar do dossel e o nível de referência  $z_R$  pro forçantes unicamente turbulentas.

### Difusão Hidráulica no Solo

Um modelo isotérmico de 3 camadas do solo é usado na determinação da difusão hidráulica e drenagem gravitacional para o aquífero. O escoamento superficial é obtido por  $P_0 - P_1$ , onde  $P_1$  é a taxa de infiltração de água na camada superior do solo, calculada pela relação mais genérica que fornece a transferência de água entre as camadas, dada por:

$$Q_{i,i+1} = K \left[ 1 + 2 \frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{D_i + D_{i+1}} \right], i = 1, 2, \quad 29$$

$$\text{onde } K = \frac{K_i K_{i+1}}{K_i + D_{i+1}}$$

$K$ : condutividade hidráulica entre as camadas,  $m s^{-1}$

$Q_{i,i+1}$ : fluxo entre a camada  $i$  e a  $i+1$ ,  $m s^{-1}$ ;

$K_i$ : condutividade hidráulica na camada  $i$ ,  $m s^{-1}$ ;

$\psi_i$ : potencial mátrico na camada  $i$ ,  $m$ ,

$$= \psi_s W_i^{-B}$$

O escoamento na última camada por drenagem gravitacional é tomado como:

$$Q_3 = K_s W_3^{B+3} \sin \chi, \quad 30$$

onde  $\chi$  é o ângulo de inclinação médio, que é um parâmetro associado à perda de água para o aquífero.

### 2.3. REPRESENTAÇÃO DOS ECOSISTEMAS DE FLORESTA E PASTAGEM

O modelo SiB2 simula os processos físicos das trocas de energia, vapor d'água e gás carbônico entre a superfície e a atmosfera, mas para isso, necessita de informações (parâmetros) representativas dos aspectos fisiológicos, estruturais, físicos e ópticos da vegetação e do solo da área de estudo. Na configuração do modelo utilizaram os parâmetros biofísicos da vegetação e do solo presentes na literatura, tais como: porosidade do solo, altura do dossel, índice de área foliar e profundidade de raízes típicos desses ecossistemas. Para a pastagem foi considerada uma altura da vegetação de 0,50 m e um índice de área foliar variando 0,7 a 3,2. (Zanchi - comunicação pessoal) (Tabela 2).

Tabela 2: Parâmetros descritivos de propriedades estruturais e físicas da vegetação e do solo obtidos nas áreas de floresta e pastagem na Amazônia.

Parâmetros	Floresta	Pastagem
Altura do dossel (m) <sup>1</sup>	35,0	0,5
Índice de área foliar (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	6,0	0,7 a 3,2
Profundidade das raízes (m) <sup>1</sup>	4,0	2,0
Porosidade do solo <sup>1</sup>	0,47	0,47

<sup>1</sup>(Gash et al., 1996)

### 2.6. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

São utilizadas nas análises dois tipos de simulações com o modelo SiB2. O primeiro conjunto que leva o nome **INI** refere-se as simulações em que o modelo foi integrado ao longo de todo o período e a umidade do solo observada foi informada apenas na inicialização. As simulações com o nome **SW** tiveram do mesmo modo o modelo integrado ao longo de todo o período, porém, nos instantes que se dispunha das medidas de umidade do solo estas eram assimiladas pelo modelo SiB2. Desta forma, nestas simulações a umidade do solo simulada era periodicamente substituída pela observada, que ofereceram uma frequência de dados semanal em grande parte do período em que as simulações foram realizadas. Estas simulações são comparadas para cada sítio no sentido de verificar a contribuição da umidade do solo para o refinamento das estimativas dos fluxos de calor latente, sensível e fluxo de CO<sub>2</sub> simulados.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Para a estimativa dos fluxos turbulentos de energia (calor latente e calor sensível), e do fluxo de CO<sub>2</sub> dos ecossistemas de floresta e de pastagem, utilizando o modelo SiB2, foi considerada toda a base de dados micrometeorológicos disponível entre 1999 e 2002. Houve necessidade de complementação dos dados a partir de outras bases no sentido de preencher falhas. Além dessas informações, medidas de variáveis do solo, como temperatura e umidade em vários níveis, foram utilizadas nas simulações. A idéia com isso é utilizar um conjunto de informações que permita obter um conjunto de soluções do modelo SiB2 que tenha o máximo de observações e que necessite do menor ajuste possível do modelo. Procedimentos de configuração e ajuste de parâmetros gerados por outros estudos foram também considerados, visando ao desempenho máximo da estratégia de modelagem. Todos os fluxos estimados pelo modelo SiB2, utilizando essa estratégia, foram comparados, quando disponível, com os fluxos observados, para que haja uma análise de consistência ao longo de todo período estudado. As análises também consideraram o desempenho do modelo nos períodos chuvosos e secos.

#### **3.1 ANÁLISE OBSERVACIONAL**

##### **3.1.1 Reserva Biológica do Jaru**

Para o sítio da Reserva Biológica do Jaru foi utilizado um conjunto de dados do período de 23 de março de 1999 até 14 de novembro de 2002, obtidos pelo sistema de monitoramento do LBA, dos quais usaram-se as seguintes variáveis: radiação de onda curta incidente (Sin), radiação de onda longa incidente (Lin), temperatura do ar (Tair), velocidade do vento (U) e precipitação (P) são as variáveis forçantes, estritamente necessárias para a simulação do modelo SiB2, disponíveis em média de 92,17% do total. O fluxo de calor sensível (Fsen), fluxo de gás carbônico (FCO<sub>2</sub>) e fluxo de calor latente (FH<sub>2</sub>O), medidos pelo método de sistema de correlação de vórtices turbulentos, disponíveis em média de 71,61% do total, que foram utilizados para fazer a comparação com os dados simulados pelo modelo (Figura 4).

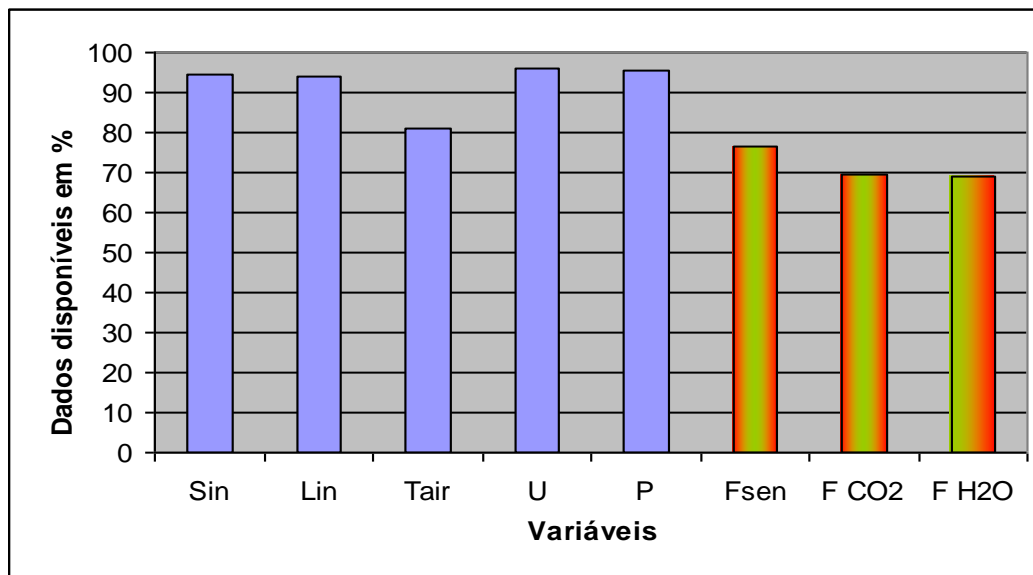


Figura 4 Disponibilidade dos dados em percentual para o Sítio da Reserva Biológica do Jarú, durante o período de 23 de março de 1999 a 14 de novembro de 2002.

### 3.1.2 Fazenda Nossa Senhora

Para o sítio da Fazenda Nossa Senhora foi utilizado um conjunto de dados do período de 5 de fevereiro de 1999 até 03 de novembro de 2002, dos quais usamos as variáveis: Radiação de onda curta incidente (Sin), radiação de onda longa incidente (Lin), temperatura do ar (Tair), velocidade do vento (U) e precipitação (P); variáveis forçantes imprescindíveis para a simulação do modelo SiB2, disponíveis em média de 92,43% do total. O fluxo de calor sensível (Fsen), fluxo de gás carbônico (FCO<sub>2</sub>) e fluxo de calor latente (FH<sub>2</sub>O), estão disponíveis em média de 33,47% do total, também utilizados para fazer a comparação com os dados simulados pelo modelo (Figura 5).

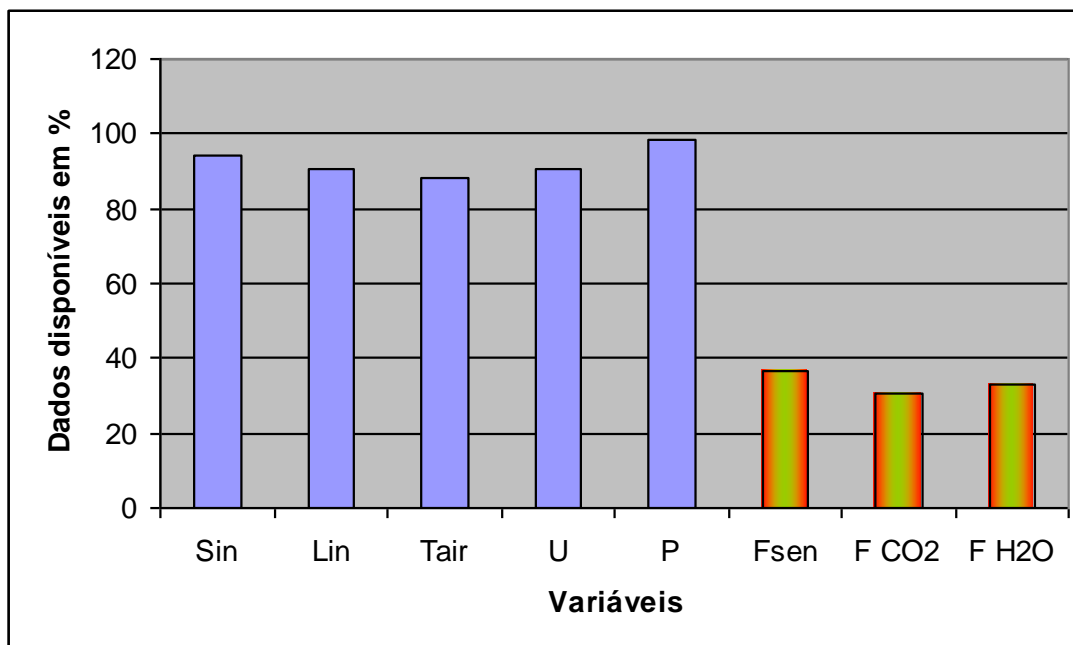


Figura 5. Disponibilidade dos dados em percentual para o Sítio da Fazenda Nossa Senhora, durante o período de 05 de fevereiro de 1999 a 03 de novembro de 2002.

### 3.1.3 Variáveis climatológicas

#### i) Precipitação

Para caracterização do padrão pluviométrico nas regiões de floresta e pastagem foram analisados os dados das estações chuvosa (Jan–Mar) e seca (Jul–Set) coletados no período de 1999 a 2002 na REBIO Jarú e na FNS em Ouro Preto Oeste (Tabela 4).

Observa-se que no intervalo de tempo estudado, o ano de 2000 apresentou o maior índice de precipitação para a floresta na estação chuvosa em torno de 1147,9 mm e 141,4 mm para a estação seca. O menor índice foi no ano de 2002 com 848 mm para estação chuvosa e 104,8 para a seca, com uma média pluviométrica para todo período de 777,4 mm no período chuvoso e 123,3mm para a estação seca. Para pastagem tivemos os maiores índices em 2001 para a estação chuvosa e 2000 para a estação seca com 824,9 mm e 303,9 respectivamente. Enquanto os menores índices pluviométricos foram encontrados no ano de 2002 com os valores de 498,3 mm e 136,7 mm para as estações chuvosa e seca, respectivamente. Apresentando durante o período estudado uma quantidade de chuva em média de 603,1 mm para a estação chuvosa e 220,9 para seca.

Tabela 3 – Total de precipitação (mm) por estação na REBIO Jaru e FNS Ouro Preto do Oeste, registrado na coleta de 1999 até 2002.

FLORESTA						PASTAGEM				
Ano	1999	2000	2001	2002	Total	1999	2000	2001	2002	Total
<b>Chuvoso</b>	35,41*	1147,96	1078,25	848,01	3109,63	500,96**	588,2	824,9	498,3	2412,36
<b>Seco</b>	127,2	141,41	119,67	104,81	493,09	216,7	303,9	226,4	136,7	883,7

\* Os dados observados são apenas do mês de março \*\* não estão observados os dados do mês de janeiro

Comparando as chuvas entre estações e sítios, verificou-se que na estação chuvosa a precipitação na pastagem é 22,4% menor que na floresta, acontecendo uma inversão na estação seca onde a quantidade de chuva na pastagem é 44,2% maior que na floresta, valores observados para todas as estações dos 4 anos. Mesmo acontecendo uma inversão entre as estações a disponibilidade de água no sistema de floresta é 10,75% maior que no da pastagem, para a região estudada (Tabela 3).

O comportamento da chuva na pastagem nas estações chuvosa e seca tem um ciclo diurno bem definido, onde se apresenta durante cada ano de 1999 a 2002, uma maior precipitação na segunda parte do dia, verificando-se um maior índice pluviométrico entre 13 e 23 horas para a estação seca e entre 12 e 21 horas para chuvosa, apresentando apenas uma discordância para o ano de 2000 na estação chuvosa (Figuras 6c e 6d). Resultados mais precisos são apresentados por Marengo *et al.* (2004) onde apresenta que a chuva estratiforme sobre a Amazônia mostra um máximo entre as 12 e 16 horas local, sugerindo uma coexistência entre, nuvens estratiformes e cumulus profundos no período da tarde.

Para a floresta verificou-se um comportamento semelhante ao da pastagem na estação seca, enquanto que para a chuvosa, os dados apresentaram uma distribuição de chuvas mais complexas, com ocorrências em todos os horários do dia, mas com alguns valores máximos relativos no início e final do ciclo diurno (Figura 6a).

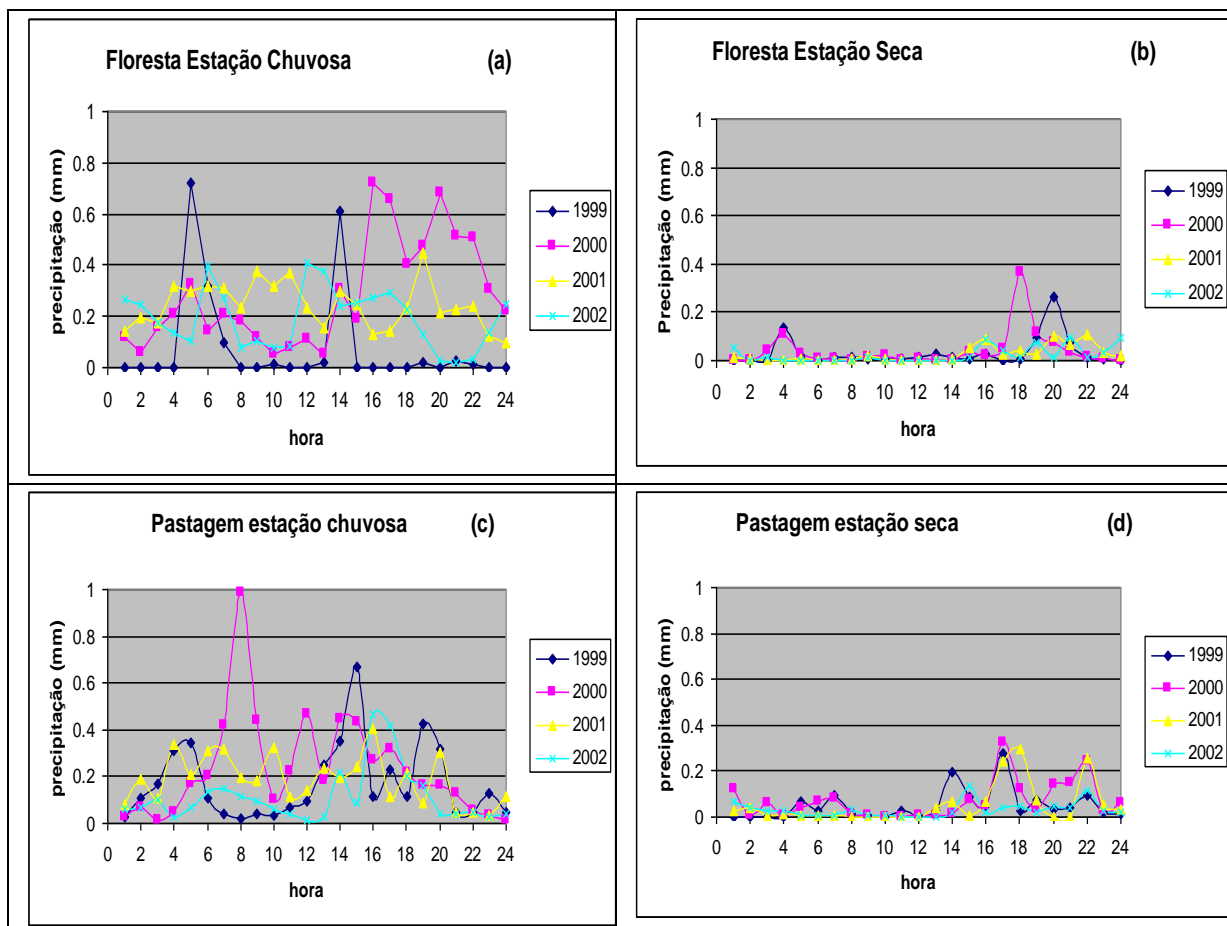


Figura 6 – Valores médios diários de precipitação por estação de 1999 a 2002 para REBIO Jaru e FNS Ouro Preto do Oeste. (a) floresta estação chuvosa, (b) Floresta estação seca, (c) pastagem estação chuvosa e (d) pastagem estação seca.

## ii) Temperatura

Na floresta a temperatura média diária do ar apresentou pequena variação sazonal, em média de  $1^{\circ}\text{C}$ , da estação seca para a chuvosa. Porém, apresentou uma maior amplitude térmica diária de  $5,4^{\circ}\text{C}$  e na estação úmida de  $8,8^{\circ}\text{C}$  na estação seca (Figura 7a). Estes resultados se aproximam dos mostrados por Aguiar *et al.* (2006), onde apresentam a temperatura máxima entre  $20$  e  $34^{\circ}\text{C}$  e a mínima variando entre  $14$  e  $24^{\circ}\text{C}$  para a estação chuvosa e uma amplitude térmica de  $9,5^{\circ}\text{C}$  para estação seca.

Para a pastagem as médias horárias da temperatura nas estações chuvosa e seca apresentaram um comportamento similar à floresta, com temperatura máxima em média de  $27,4^{\circ}\text{C}$  e mínima de  $22,1^{\circ}\text{C}$  na estação chuvosa, e para a estação seca de  $30,4^{\circ}\text{C}$  e  $20,2^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Apresentando uma amplitude térmica de  $5,3^{\circ}\text{C}$  para estação chuvosa e  $10,1^{\circ}\text{C}$  para a seca, conforme mostrado na figura 7b.



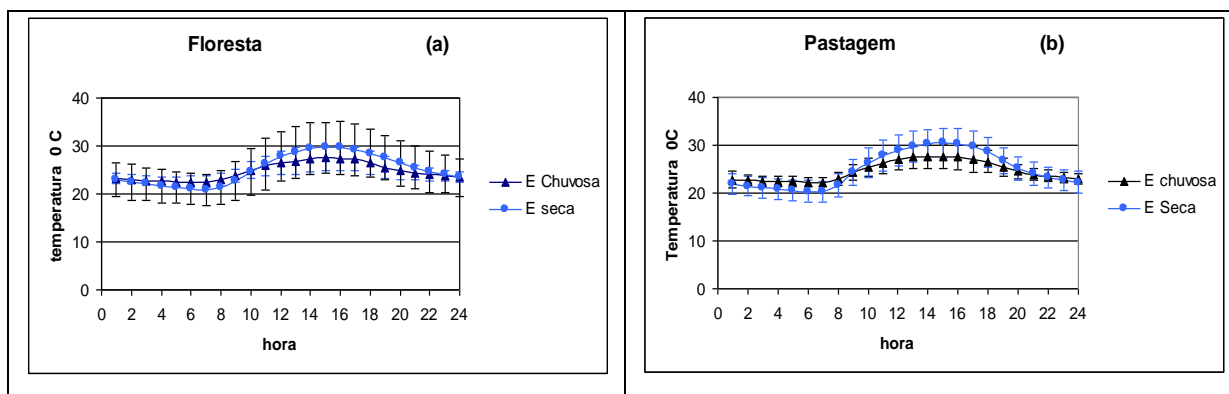


Figura 7 – Representação da média do ciclo diário de temperatura por estação para o período de 1999 a 2002 da REBIO Jaru e FNS Ouro Preto do Oeste. (a) floresta e (b) Floresta.

### iii) Radiação solar e terrestre incidentes.

A radiação solar incidente possui um comportamento sazonal claro, com valores médios diários de  $215 \text{ W m}^{-2}$  para a estação seca e  $197 \text{ W m}^{-2}$  para a chuvosa na floresta. Na pastagem os valores de  $205 \text{ W m}^{-2}$  e  $196,6 \text{ W m}^{-2}$  para as estações chuvosa e seca, respectivamente. Verifica-se que a quantidade de radiação solar disponível na estação seca para a floresta é 4,9% maior que na pastagem. O comportamento dos dois sítios no período chuvoso é praticamente o mesmo.

Percebeu-se que a radiação de onda longa incidente para a estação chuvosa na floresta é ligeiramente mais alta com relação a pastagem, no entanto tem comportamento similar para estação seca (Figuras 8a e b). O que difere do apresentado por Randow *et al.* (2004) que encontraram dados semelhantes para os dois sítios, embora exista uma indicação de ligeira alta no pasto na estação chuvosa (Figuras 8a e b).

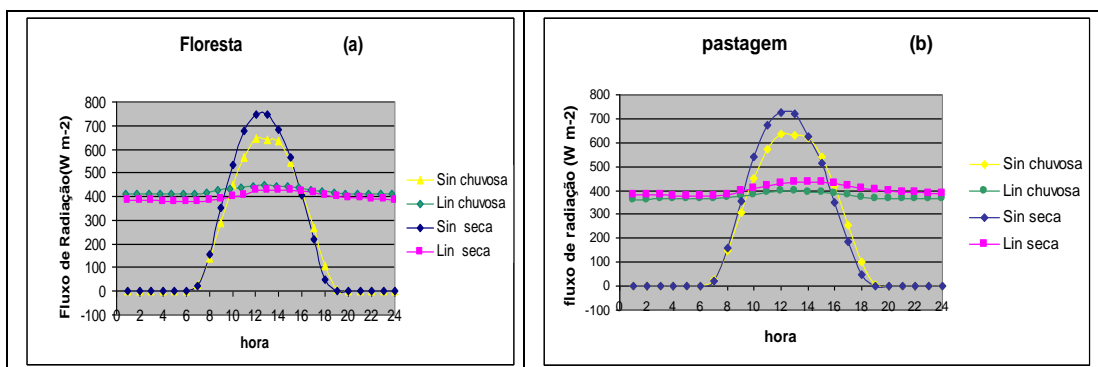


Figura 8 – Média do comportamento do Clico diurno de radiação solar incidente (Sin) e radiação terrestre incidente (Lin) nas estações chuvosa e seca para o período de 1999 a 2002 para os dois sítios. (a) floresta e (b) pastagem.

#### iv) Fluxos de calor sensível e latente

O fluxo de calor sensível na pastagem variou predominantemente entre  $-5,5$  e  $111,5 \text{ W m}^{-2}$  na estação chuvosa e entre  $-12,3$  e  $177,8 \text{ W m}^{-2}$  na seca, sendo tipicamente negativo no período noturno. No padrão médio do ciclo diurno na estação seca, os fluxos são aproximadamente  $9,2 \text{ W m}^{-2}$  maiores que na estação úmida (Figuras 9c e d). Para a floresta a variação do fluxo de calor sensível se apresenta entre  $-6$  e  $98,7 \text{ W m}^{-2}$  para o período chuvoso e entre  $-7,7$  e  $138,3 \text{ W m}^{-2}$  para o período seco. Apresentou um padrão médio do ciclo diurno na estação seca onde os fluxos são aproximadamente  $7,7 \text{ W m}^{-2}$  maiores que no período chuvoso (Figuras 9a e b). Os fluxos de calor sensível mostraram valores negativos no período noturno, entre 18 horas e 7 horas, quando a superfície e a vegetação perdem calor para a atmosfera (SANTOS, 2004).

O fluxo de calor latente na estação chuvosa apresentou média diária de  $87,3 \text{ W m}^{-2}$  e na seca de  $85,8 \text{ W m}^{-2}$  na floresta. Os valores mínimo e máximo visualizados na média do ciclo diurno são  $0,1$  e  $299,2 \text{ W m}^{-2}$  para o período úmido como, também,  $0,3$  e  $321,8 \text{ W m}^{-2}$  para estação seca, conforme curvas apresentadas nas figuras 9a e 9c. Os fluxos de calor sensível aumentaram em média  $40 \text{ W m}^{-2}$  e  $60 \text{ W m}^{-2}$  em seu pico do ciclo diurno na estação seca com relação ao período chuvoso na floresta e pastagem, respectivamente. Valores relacionados com a precipitação, pois, na estação seca com a diminuição das chuvas a disponibilidade de água no solo é menor principalmente nas camadas superiores, influenciando na evapotranspiração que acontece em taxas menores, resultados esses observados por Randow *et al.*, (2004) e Aguiar *et al.*, (2006). Uma menor variabilidade sazonal para a floresta ocorre em função do fato que o abastecimento hídrico da vegetação é garantida por mais tempo devido a profundidade das raízes que mantêm as taxas de evapotranspiração altas no período seco. Segundo Araujo *et al.* 2002 e

Rocha *et al.*, 2004, na floresta se mantém altas as taxas de evapotranspiração mesmo durante a estação seca que desta forma apresenta pouca variabilidade sazonal.

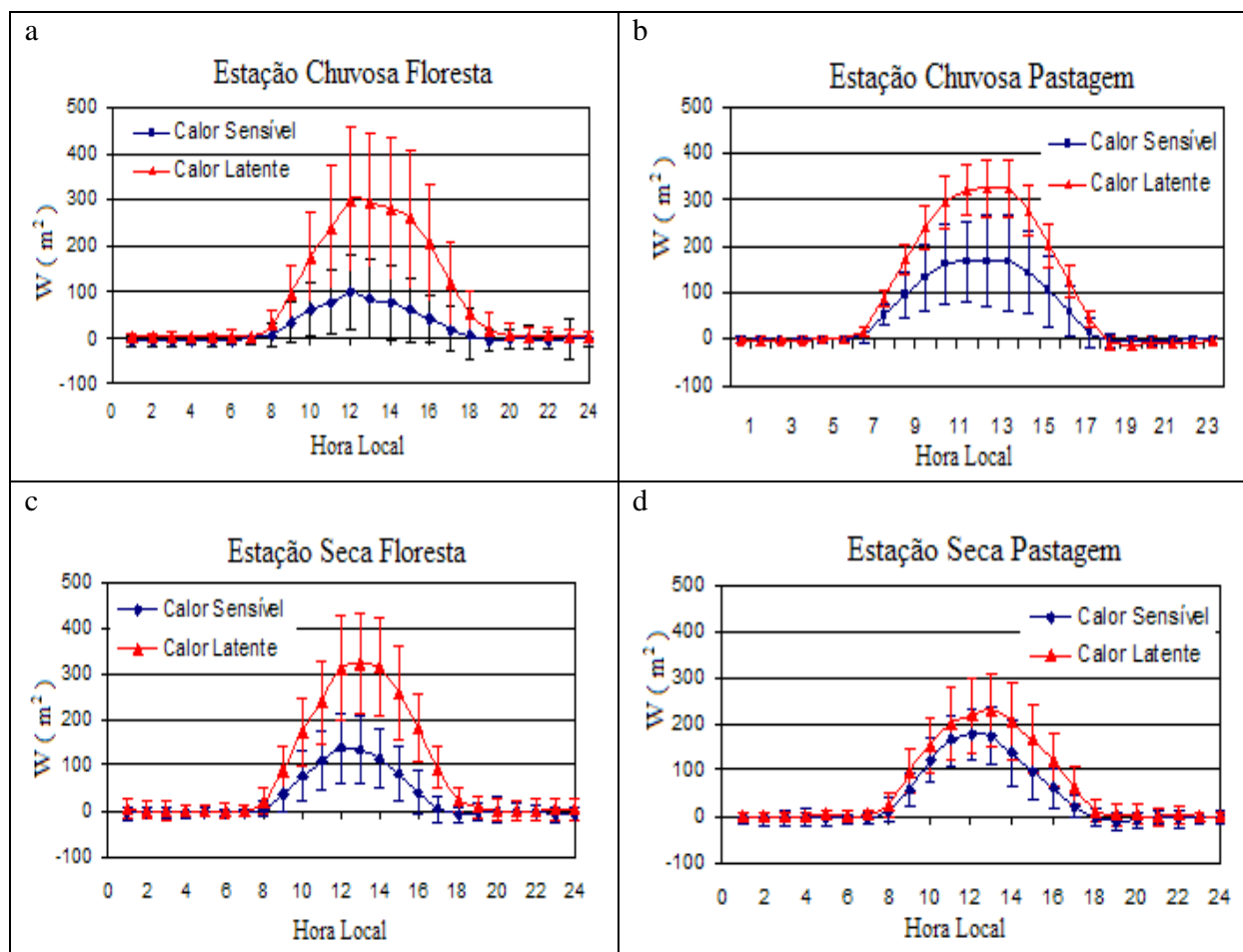


Figura 9 - Fluxo de calor sensível e latente da floresta e pastagem nas estações chuvosa e seca. (a) estação chuvosa floresta, (b) estação chuvosa pastagem (c) estação seca floresta e (d) estação seca pastagem.

#### v) Fluxo de $CO_2$

A fixação de  $CO_2$  por fotossíntese pelas plantas converte a energia solar (Radiação Fotossinteticamente Ativa - RFA) em energia química:



Ela é responsável pelo crescimento da vegetação terrestre e aquática, sustentando a cadeia trófica, além de diminuir a concentração de  $CO_2$  devido a fixação realizada pelas folhas. Isso

acontece por meio da variação na abertura estomática na superfície foliar que controla a liberação da umidade contida na vegetação, assim como a entrada ou saída do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera.

O ciclo médio horário de fluxo de CO<sub>2</sub> para floresta e pastagem para o período chuvoso (Figura 10a) mostra que o máximo valor médio horário absorvido foi de 20,01  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  às 12:00 horas na floresta e de 18,86  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  às 12:00 horas na pastagem. Obteve-se para a estação seca (Figura 10b) o máximo valor médio horário absorvido de 13,67  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  às 13:00 horas na floresta e de 13,34  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  às 13:00 horas na pastagem. Apresentando uma diferença de 6,34  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  entre as estações para a floresta e de 5,52  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  entre as estações na pastagem.

No período noturno a respiração das plantas e dos microorganismos vivos responsáveis pela decomposição da matéria morta libera CO<sub>2</sub> para atmosfera. As medidas encontradas para a floresta variam entre 3 e 8  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  para as duas estações, valores similares foram vistos em Andreae *et al.* (2002) e Randow *et al.* (2004). A floresta apresenta um pico positivo de aproximadamente 11  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  entre as 7:00 e 9:00 horas fato que se justifica no acúmulo destes fluxos durante a noite no interior da vegetação que com a ação do sol é deslocado para atmosfera de maneira intensa, voltando a normalidade por volta das 9:00 horas. Enquanto que na pastagem tem-se um fluxo positivo a noite que varia entre 2 a 8  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  para o período chuvoso e de 0 a 5  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  para estação seca.

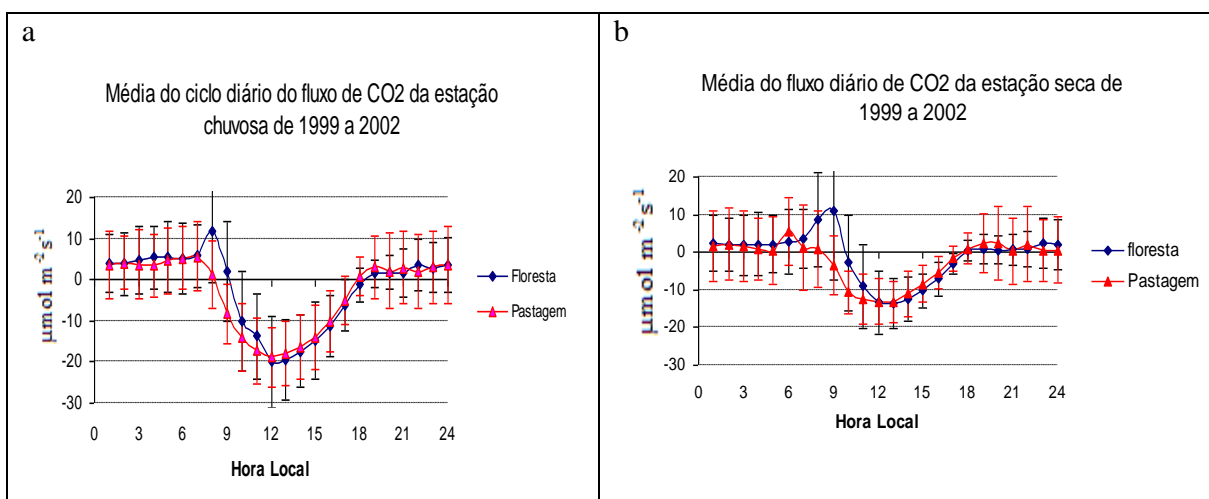


Figura 10 – Fluxo de CO<sub>2</sub> nos dois sítios nas estações chuvosa e seca. (a) estação úmida floresta e pastagem e (b) estação seca floresta e pastagem.

### 3.2 SIMULAÇÕES COM O MODELO SiB2

O desempenho do modelo SiB2 foi verificado comparando os resultados de fluxos de calor latente e sensível, fluxo de CO<sub>2</sub> e umidade do solo com as respectivas medidas, quando disponíveis, obtidas nos sítios de floresta e pastagem. A comparação foi tomada por amostragem de dias dos períodos chuvoso e seco e é função da disponibilidade de dados. A análise foi realizada dos pontos de vista qualitativo e quantitativo, neste último caso, parâmetros estatísticos foram usados como indicadores de desempenho do modelo. A qualidade dos resultados foi avaliada de acordo com a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a correlação entre os dados simulados e os dados observados ( $\alpha$ ). Em cada simulação os resultados de saída do modelo são comparados com os observados. No caso do sítio de floresta a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema simulado pelo modelo SiB2 é comparado com o fluxo de CO<sub>2</sub> medido pelo sistema de vórtice de correlações de forma qualitativa, tendo em vista que dados referentes ao efeito de armazenamento noturno de CO<sub>2</sub> no subdossel não são disponíveis. No caso de pastagem, este efeito não acontece, portanto os resultados modelados podem ser comparados diretamente.

#### 3.2.1 Umidade do solo

A figura 11 apresenta a variação do grau de saturação do solo (razão entre o conteúdo volumétrico de água no solo e sua porosidade) simulado pelo modelo e mais as observações disponíveis, referentes a camada de 0 a 4m do perfil do solo, para o sítio de floresta, entre janeiro de 2000 e setembro de 2002. Adicionalmente é apresentado o ciclo anual da chuva. Na comparação entre resultados do modelo e as observações verifica-se que o modelo representa bem a variação da umidade do solo no que se refere ao padrão seco e chuvoso. No período das chuvas o solo é reabastecido, tornando-se mais úmido, enquanto no período seco a perda por transpiração reduz o conteúdo de água no solo através do mecanismo de extração de água pelas raízes que na floresta pode atingir grande profundidade. Embora capture o padrão de variação sazonal da umidade do solo, o modelo mantém o solo em condições mais úmidas que a observada de forma sistemática. Esse fato pode estar associado a definição das propriedades físicas do solo e de sua variação com a profundidade, tomadas de Rocha *et al.* (1996) e consideradas homogêneas para todo o perfil do solo.

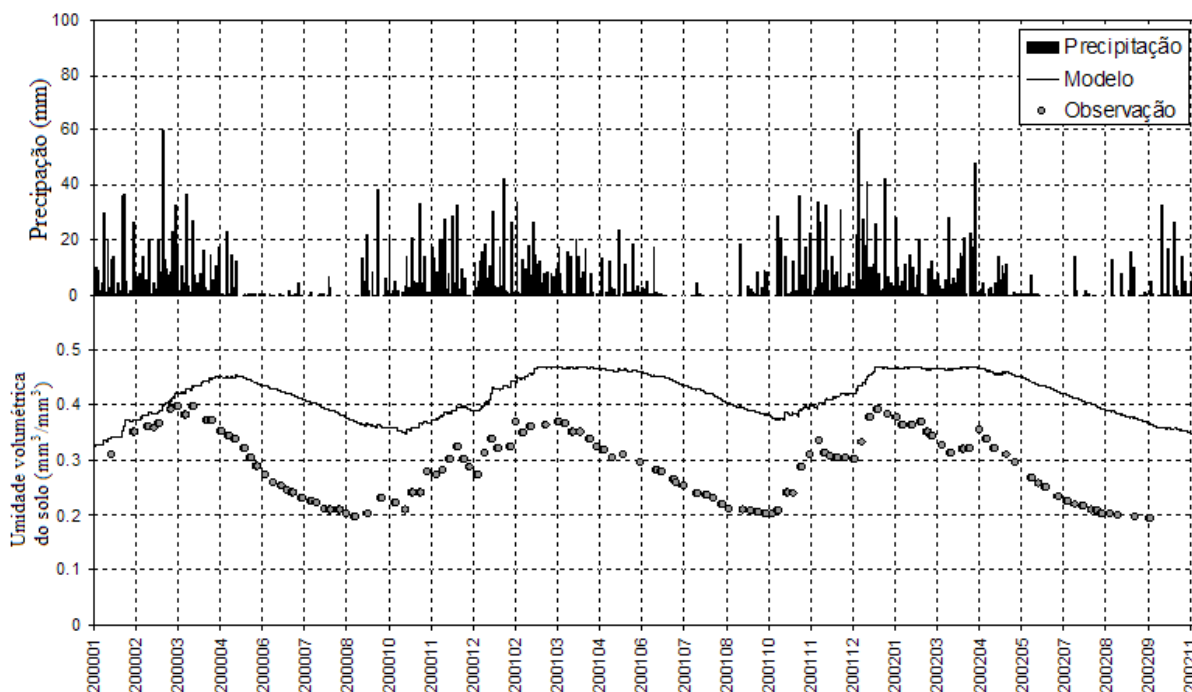


Figura 11: Ciclos sazonais da precipitação e umidade do solo (unidade volumétrica) na camada de 0 a 4m, calculada pelo modelo e a observação disponível para o sítio de floresta entre janeiro de 2000 e setembro de 2002.

Na figura 12 é apresentada a variação do grau de saturação do solo simulado pelo modelo e mais as observações disponíveis, referente a camada de 0 a 2m do perfil do solo, para o sítio de pastagem, entre fevereiro de 1999 e janeiro de 2002. Nesta camada o padrão observado de variação da umidade do solo mostra que o solo se mantém relativamente úmido, durante toda a estação chuvosa, e quando esta cessa o conteúdo de água no solo vai reduzindo progressivamente até o ápice da estação seca. A menor espessura da camada do solo também reflete o efeito dos vários eventos de chuva na restauração da umidade do solo. Comparativamente, o modelo representa o padrão observado da umidade do solo na pastagem, de forma até mais ajustada que na floresta, porém também sofrendo dos mesmos efeitos sistemáticos associados às propriedades do solo. Também na pastagem, a oscilação entre estação chuvosa e seca é menos pronunciada que na floresta. Isso deve-se ao fato de que na floresta as raízes são mais profundas e abundantes que na pastagem fazendo com que as taxas de perda de água por transpiração se mantenham elevadas mesmo na estação seca. A consideração de raízes mais profundas que 2m em um outro conjunto de simulações para o sítio de pastagem contribuíram para o aumento da umidade do solo nesta camada, enfraquecendo ainda mais a representação da variação sazonal da umidade do solo pelo SiB2. Nas simulações em que a umidade do solo observada foi assimilada durante a integração do modelo os campos de umidade do solo foram praticamente os mesmos e por isso não foram incluídos nas figuras.

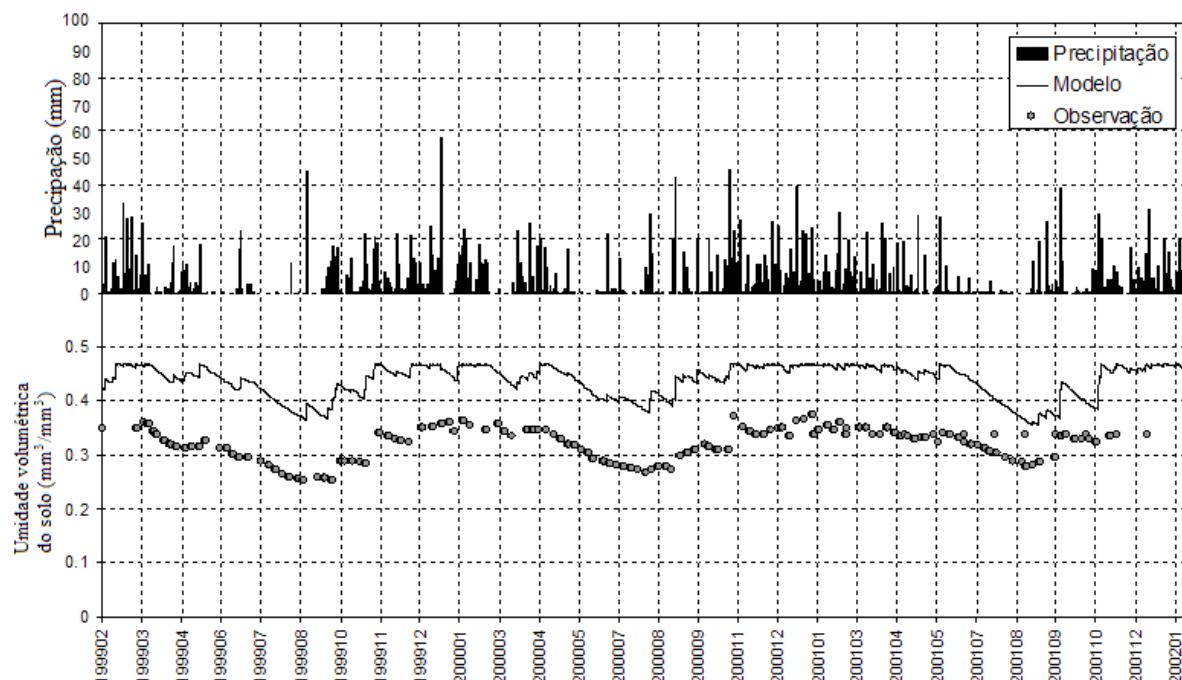


Figura 12: Ciclos sazonais da precipitação e umidade do solo (unidade volumétrica) na camada de 0 a 2m, calculada pelo modelo e a observação disponível para o sítio de pastagem entre fevereiro de 1999 e janeiro de 2002.

### 3.2.2 Comportamento estacional dos fluxos de calor latente, sensível e gás carbônico

#### a) Sítio de Floresta

Na Figura 13 são apresentados os fluxos de calor latente (13a) e sensível (13b) simulados pelo modelo SiB2 (Mod), juntamente com as respectivas medidas (Obs) obtidas no sítio de floresta durante a época chuvosa de 2001. O modelo consegue representar o padrão do ciclo diário e a variação dia-a-dia dos fluxos observados. Ocasionalmente, os fluxos simulados tendem a ser superestimados em alguns dias. Isso é resultado principalmente das inconsistências entre as medidas micrometeorológicas utilizadas no modelo e as medidas de fluxos utilizadas em sua validação. Os sistemas de monitoramento são independentes e possuem domínios amostrais distintos, inerentes ao princípio de funcionamento de cada sensor, embora estejam montados na mesma torre. A medida do ajuste entre os dados observados e simulados de LE e H pode ser verificada através do coeficiente de correlação, que ficou em torno de 0,924 e 0,975, e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) que variou entre 56,71 W/m<sup>2</sup> e 44,89 W/m<sup>2</sup>, nesta ordem.

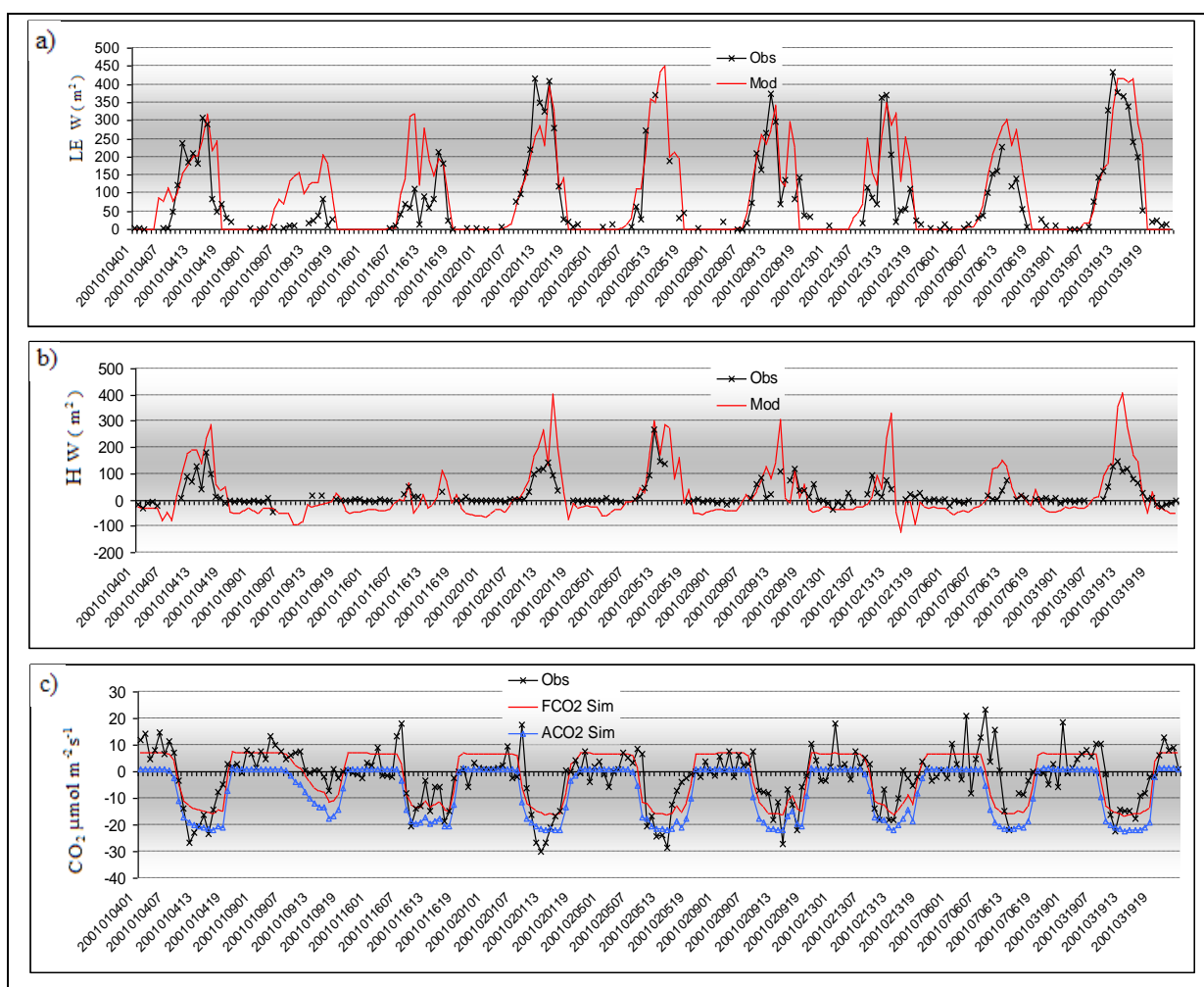


Figura 13: Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado (Obs) e modelados (Mod) e fluxo de CO<sub>2</sub> observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de CO<sub>2</sub> simulados (FCO<sub>2</sub> Sim e ACO<sub>2</sub> Sim) (c) referente ao sítio de floresta na estação chuvosa de 2001.

A comparação entre o fluxo de CO<sub>2</sub> observado (Obs) e simulado (FCO<sub>2</sub> Sim) para o período chuvoso de 2001 é apresentado na figura 13c. A correlação entre as curvas é de 0,897 e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 4,117 μmol/m<sup>2</sup>/s (Tabela 04). Em geral o modelo subestima a assimilação durante o período diurno e superestima a emissão noturna. O período em que a vegetação mantém a máxima assimilação diurna é também superior ao observado. De modo contrário aos fluxos de calor latente e sensível, o fluxo de CO<sub>2</sub> simulado é pouco sensível às variações rápidas nos parâmetros ambientais. As diferenças inerentes a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema e o fluxo de CO<sub>2</sub> não prejudicam estas análises, mas para avaliar a participação dos termos de respiração heterotrófica e autotrófica na troca de CO<sub>2</sub>, é apresentada adicionalmente a curva referente a fotossíntese (ou assimilação do ecossistema – ACO<sub>2</sub> Sim) calculada pelo



modelo. O comparativo indica que o termo de respiração no modelo SiB2 tem efeitos compensados entre noite e dia e portanto varia pouco ao longo do dia.

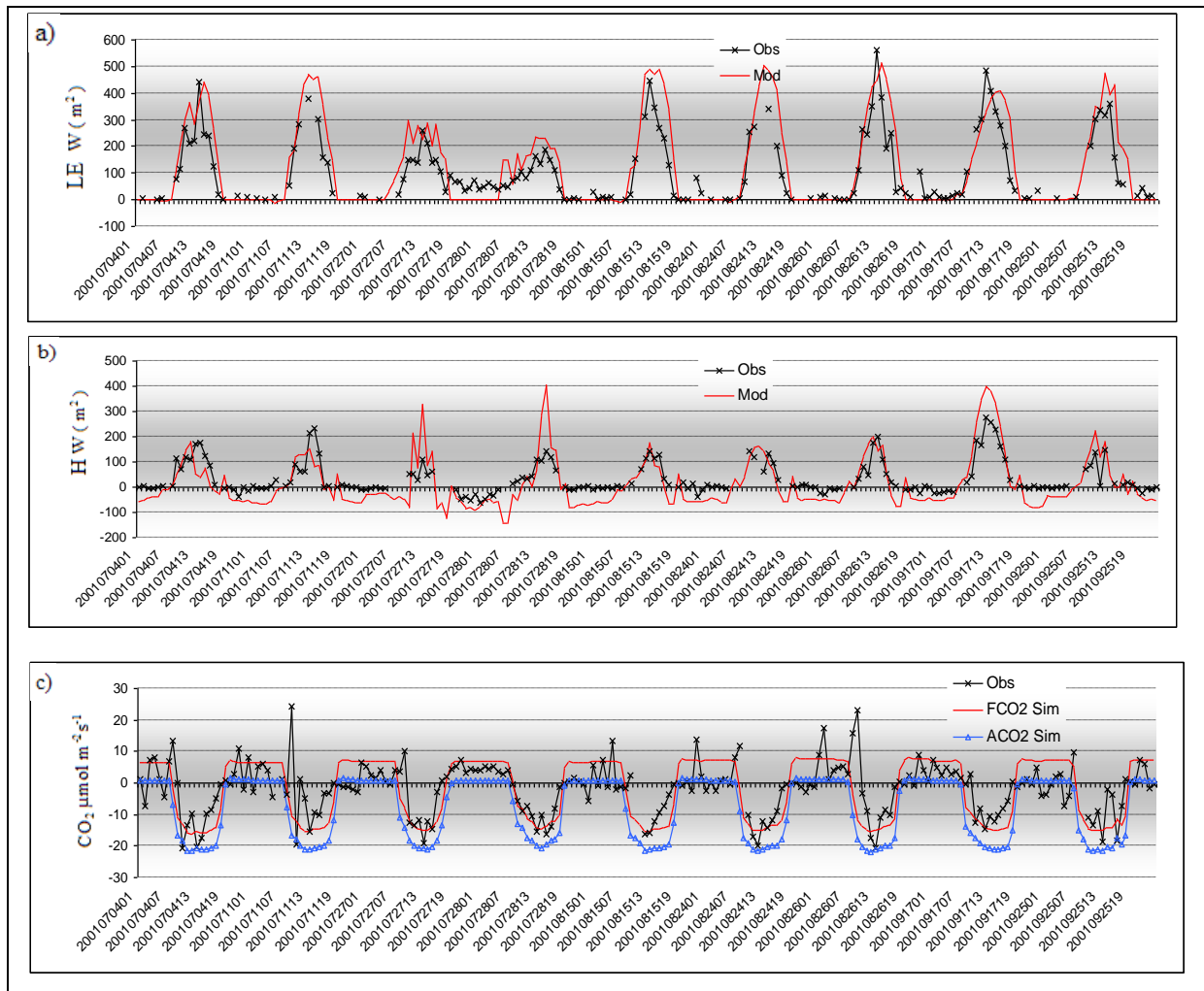


Figura 14: Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado (Obs) e modelados (Mod) e fluxo de CO<sub>2</sub> observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de CO<sub>2</sub> simulados (FCO<sub>2</sub> Sim e ACO<sub>2</sub> Sim) (c) referente ao sítio de floresta na estação seca de 2001.

Os resultados entre os fluxos de calor latente, calor sensível e fluxo de CO<sub>2</sub> medidos (Obs) e simulados (FCO<sub>2</sub> Sim e ACO<sub>2</sub> Sim) no sítio de floresta para o período seco de 2001 são apresentados nas figuras 14a, 14b e 14c, respectivamente. Observa-se nas figuras 14a e 14b uma boa aproximação entre os dados observados e simulados de LE e H com coeficientes de correlação de 0,948 e 0,950 e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 80,299  $W/m^2$  e 40,485  $W/m^2$ , nesta ordem. Na figura 14c a comparação entre o fluxo CO<sub>2</sub> simulado e o observado mostra um menor ajuste entre as curvas, com coeficiente de correlação de 0,802 e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) 5,92  $\mu mol/m^2/s$ . Considerando apenas a curva de assimilação de CO<sub>2</sub>

(ACO<sub>2</sub> Sim) verifica-se que no modelo SiB2 as componentes de respiração do ecossistema contribuem para acentuar a assimilação no período diurno frente ao observado.

Considerando todo o conjunto de dados disponíveis de todos os anos por estação no sítio de floresta, o padrão de ajuste entre os fluxos de calor latente, calor sensível e de CO<sub>2</sub> observados e simulados se mantém semelhante ao que foi discutido acima. Ou seja, na estação chuvosa a correlação global para o fluxo de calor latente ficou em torno de 0,955 e para o calor sensível em torno de 0,981, a raiz do erro quadrático médio (RMSE) foi 61,99 W/m<sup>2</sup> e 58,5 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Para o fluxo de CO<sub>2</sub> os valores foram um pouco menores, cerca de 0,888 para correlação e 4,65 μmol/m<sup>2</sup>/s para a RMSE. Na estação seca houve pouca modificação nestes índices (Tabela 04). Para LE a correlação foi 0,961, para H 0,978 e para o fluxo de CO<sub>2</sub> foi cerca de 0,894, equanto a RMSE ficou em torno de 69,05 W/m<sup>2</sup>, 46,94 W/m<sup>2</sup> e 4,71 μmol/m<sup>2</sup>/s.

Tabela 04: CORRELAÇÃO e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) dos fluxos entre os fluxos simulados e observados da floresta de 2000 até 2002

ANO	Período	CORRELAÇÃO			RMSE		
		LE	H	FCO <sub>2</sub>	LE	H	FCO <sub>2</sub>
2000	chuvoso	0,957	0,829	0,859	49,35	51,79	5,61
	seco	0,946	0,968	0,902	68,69	57,69	4,49
2001	chuvoso	0,924	0,975	0,897	56,72	44,89	4,12
	seco	0,949	0,950	0,801	80,30	40,49	5,92
2002	chuvoso	0,937	0,933	0,889	49,87	91,62	4,67
	seco	0,959	0,968	0,909	63,24	50,61	4,36
2000 a 2002	chuvoso	0,955	0,981	0,888	61,99	58,51	4,65
	seco	0,961	0,978	0,894	69,05	46,94	4,71

## b) Sítio de Pastagem

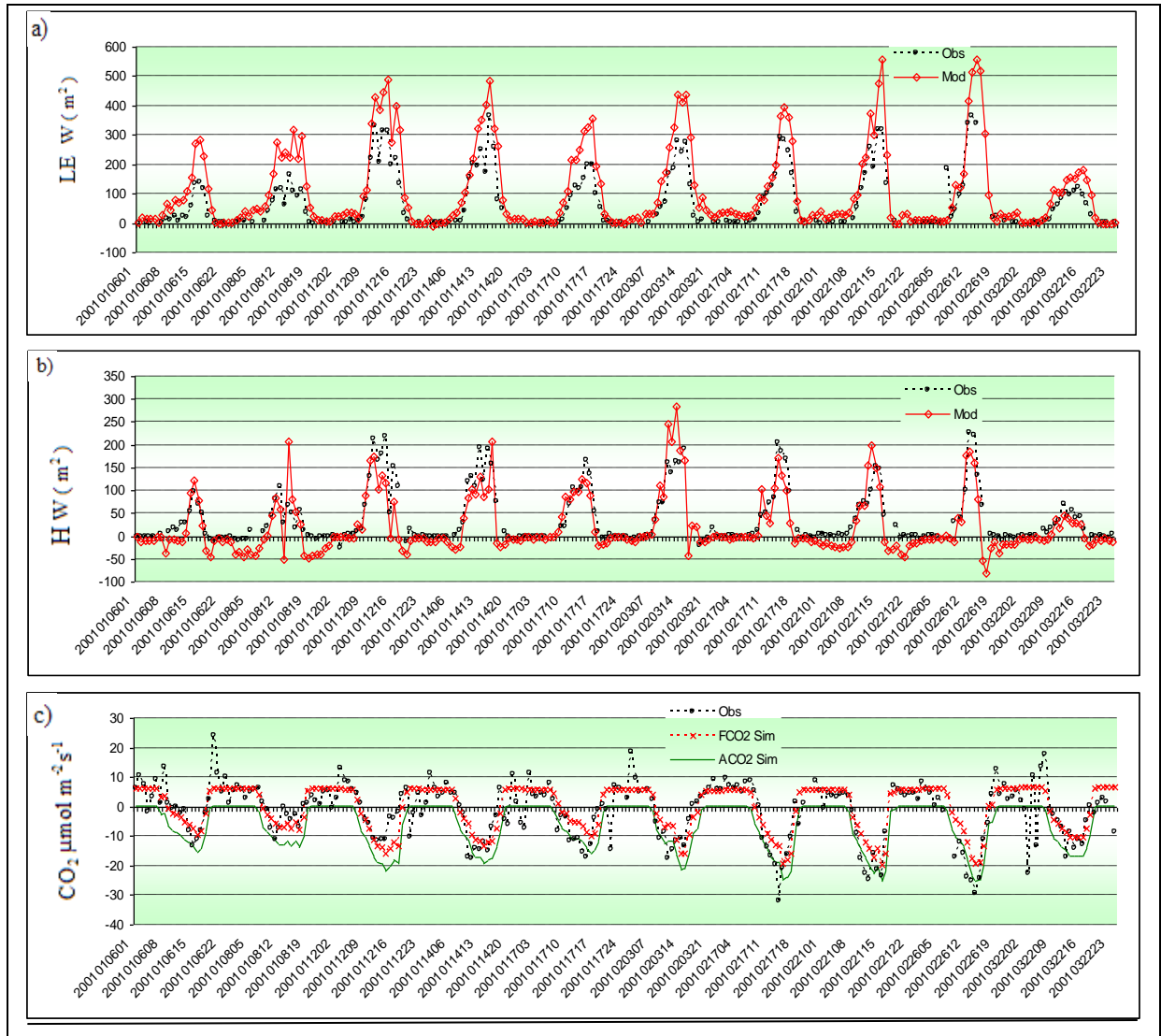


Figura 15: Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado (Obs) e modelados (Mod) e fluxo de  $CO_2$  observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de  $CO_2$  simulados (FCO<sub>2</sub> Sim e ACO<sub>2</sub> Sim) (c) referente ao sítio de pastagem na estação chuvosa de 2001.

Os resultados para os fluxos de calor latente, sensível e de  $CO_2$  observados e simulados para o sítio de pastagem no período chuvoso de 2001 são comparados nas figuras 15a, 15b e 15c. Na análise do comportamento dos fluxos observados e simulados, verifica-se que o modelo SiB2 tende a superestimar o fluxo de calor latente considerando os parâmetros utilizados (Figura 15a), mas conseguindo capturar a variação dia-a-dia desse fluxo de forma satisfatória. O índice de correlação foi superior ao obtido no sítio de floresta chegando a 0,986, porém com a raiz do erro quadrático médio (RMSE) maior, cerca de 72,64  $W/m^2$  (Tabela 05). Já para o calor sensível, o índice de correlação ficou em torno de de 0,966 e a RMSE por volta de de 17,45  $W/m^2$  (Tabela 05),

apresentando um bom ajuste entre as curvas conforme ilustra a figura 15b. Diferentemente do sítio de floresta, no sítio de pastagem os fluxos de CO<sub>2</sub> observados e simulados apresentam um melhor ajuste, tanto durante a noite como durante o dia (Figura 15c). A correlação ficou em cerca de 0,943, enquanto que a RMSE ficou em torno de 2,89 μmol/m<sup>2</sup>/s (Tabela 05). De modo contrário ao sítio de floresta, na pastagem a análise considerando apenas a curva de assimilação (ACO<sub>2</sub> Sim) mostra que as componentes de respiração são bem representadas no modelo para o ecossistema de pastagem.

Em virtude de problemas na torre da pastagem, o ano de 2001 não dispõe de monitoramento de fluxos durante a estação seca, desta forma é tomada como ilustração do desempenho do modelo a estação seca de 2000. A figura 16 apresenta a série temporal dos fluxos de LE, H e CO<sub>2</sub> observados e os simulados pelo modelo SiB2 no período seco de 2000 na pastagem. Verifica-se que o modelo tende a subestimar o fluxo de calor latente em alguns dias (Figura 16a). Em termos dos índices de ajuste entre as curvas têm-se que o coeficiente e correlação ficou em torno de 0,977 e a RMSE em torno de 26,18 W/m<sup>2</sup> (Tabela 06). Para o fluxo de calor sensível o ajuste é mais fino com coeficiente de correlação em torno de 0,995 e a RMSE de 26,95 W/m<sup>2</sup> (Figura 16b). Para o fluxo de CO<sub>2</sub> os dados simulados se apresentam muito próximos dos observados (Figura 16c). O ajuste em termos da correlação é de 0,876 e a RMSE é de 3,92 μmol/m<sup>2</sup>/s. Novamente, a análise da participação dos termos de respiração no comparativo com a curva de assimilação (ACO<sub>2</sub> Sim) confirma o bom ajuste destes componentes do modelo SiB2 ao padrão observado.

Ao se analisar todo o período de dados disponíveis para o sítio de pastagem verifica-se que o modelo SiB2 apresentou melhor ajuste na representação dos fluxos LE, H e CO<sub>2</sub> da estação seca, com valores de correlação de 0,990, 0,987 e 0,936, nesta ordem (Tabela 05). Já o erro quadrático médio ficou em torno de 67,56 W/m<sup>2</sup> para LE, 12,09 W/m<sup>2</sup> para H e 4,60 μmol/m<sup>2</sup>/s para o fluxo de CO<sub>2</sub>. Na estação seca, o destaque vai para a simulação de LE, que apesar da pequena redução da correlação, passou a 0,976, teve uma grande redução no erro quadrático médio que passou a 31,55 W/m<sup>2</sup>. Para H e o fluxo de CO<sub>2</sub> os valores foram respectivamente, 0,987 e 0,823 para correlação, e 19,44 W/m<sup>2</sup> e 5,06 μmol/m<sup>2</sup>/s para a RMSE.

Tabela 05. CORRELAÇÃO e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) dos fluxos entre os fluxos simulados e observados da Pastagem no período de 1999 a 2002

ANO	Período	CORRELAÇÃO			RMSE		
		LE	H	FCO <sub>2</sub>	LE	H	FCO <sub>2</sub>
1999	chuvoso	0,954	0,956	0,872	55,87	12,89	5,49
	seco	0,957	0,959	0,700	42,16	24,809	7,11
2000	chuvoso	0,913	0,972	0,849	84,97	19,239	7,29
	seco	0,977	0,995	0,876	26,18	26,959	3,93
2001	chuvoso	0,987	0,966	0,943	72,64	17,459	2,89
	seco	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2002	chuvoso	0,983	0,985	0,921	67,26	19,929	6,53
	seco	-----	-----	-----	-----	-----	-----
1999 a 2002	chuvoso	0,989	0,987	0,936	67,56	12,10	4,60
	Seco *	0,976	0,987	0,823	31,55	19,44	5,06

Obs: Para o período Seco temos a correlação e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), apenas para os anos de 1999 e 2000.

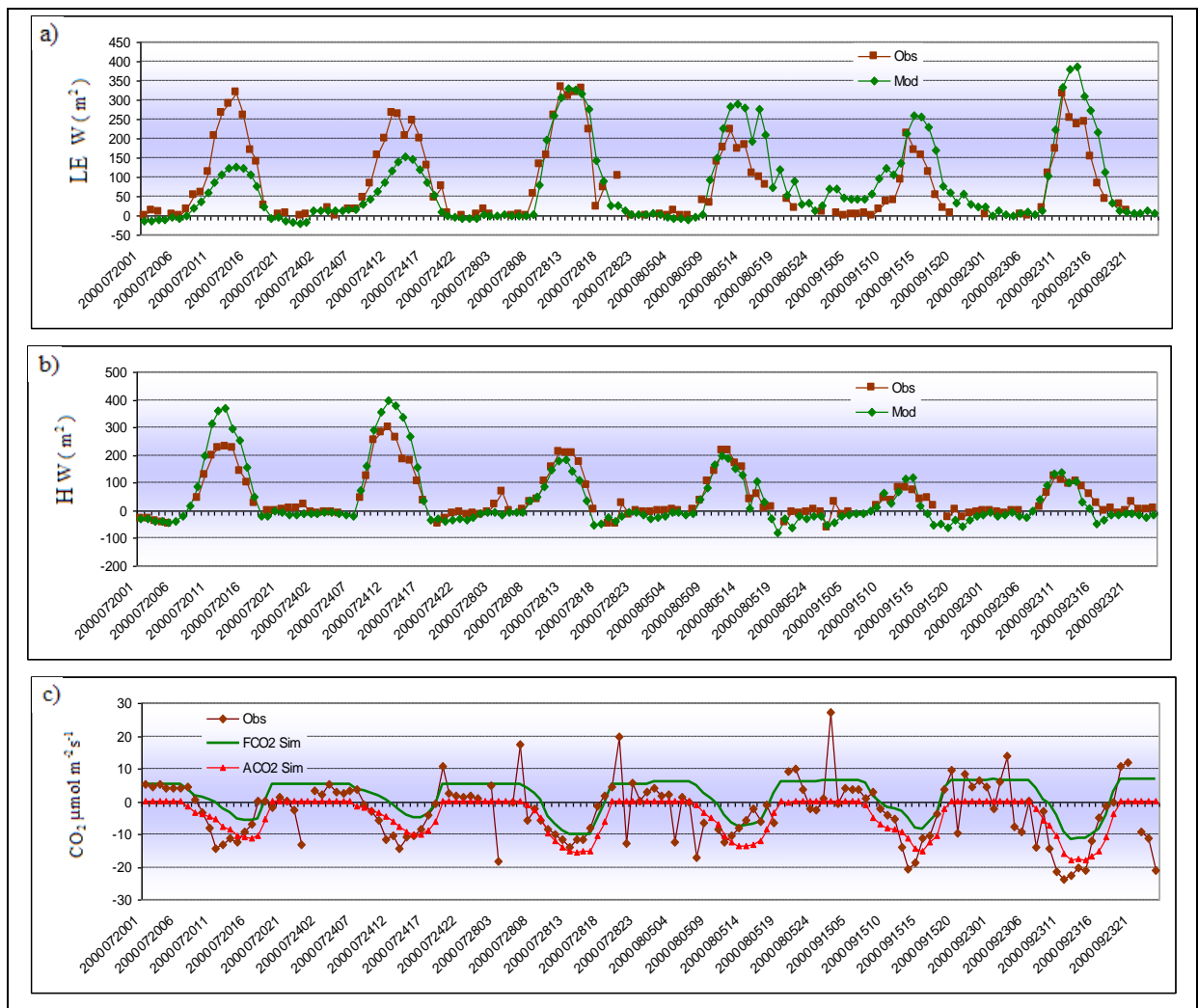


Figura 16: Fluxos diários de calor latente (a), calor sensível (b) observado (Obs) e modelados (Mod) e fluxo de CO<sub>2</sub> observado (Obs) como também o fluxo e assimilação de CO<sub>2</sub> simulados (FCO<sub>2</sub> Sim e ACO<sub>2</sub> Sim) (c) referente ao sítio de pastagem na estação seca de 2000.

### 3.2.3 Análise dos ciclos sazonais

Nesta seção é analisado o comportamento dos fluxos de calor latente, sensível e fluxo de  $\text{CO}_2$  considerando as médias mensais ao longo do período de estudo em ambos os sítios. São utilizadas nas análises as simulações INI e SW desenvolvidas com o modelo SiB2.

#### a) Sítio de floresta

Nas simulações SW a assimilação da umidade do solo favoreceu a redução do erro sistemático no fluxo de calor latente no sítio de floresta com relação as simulações INI quando comparado às observações (compare  $LE_{sw}$  com  $LE_{ini}$  na Figura 17), e melhorou o ajuste entre o fluxo de calor sensível simulado e observado. A variação dos fluxos de calor médios mensais ao longo do período 2000 a 2002 é capturada pelo modelo e o ajuste é mais fino durante as épocas secas. A tendência de manter os fluxos de calor latente maior que o observado no sítio de floresta está associado ao fato do modelo também simular condições mais úmidas do solo, conforme visto anteriormente, (Figura 14 a) o que evita o efeito de estresse hídrico do solo na transpiração da floresta, ponto que tipicamente é atingido no modelo nas condições de umidade do solo abaixo de 0,4. Além disso, o fato do modelo requerer o fechamento do balanço de energia e as observações não o satisfazem, também contribui para essa superestimativa tendo em vista que a energia excedente será convertida em ambas formas de calor, dependendo das condições ambientais.

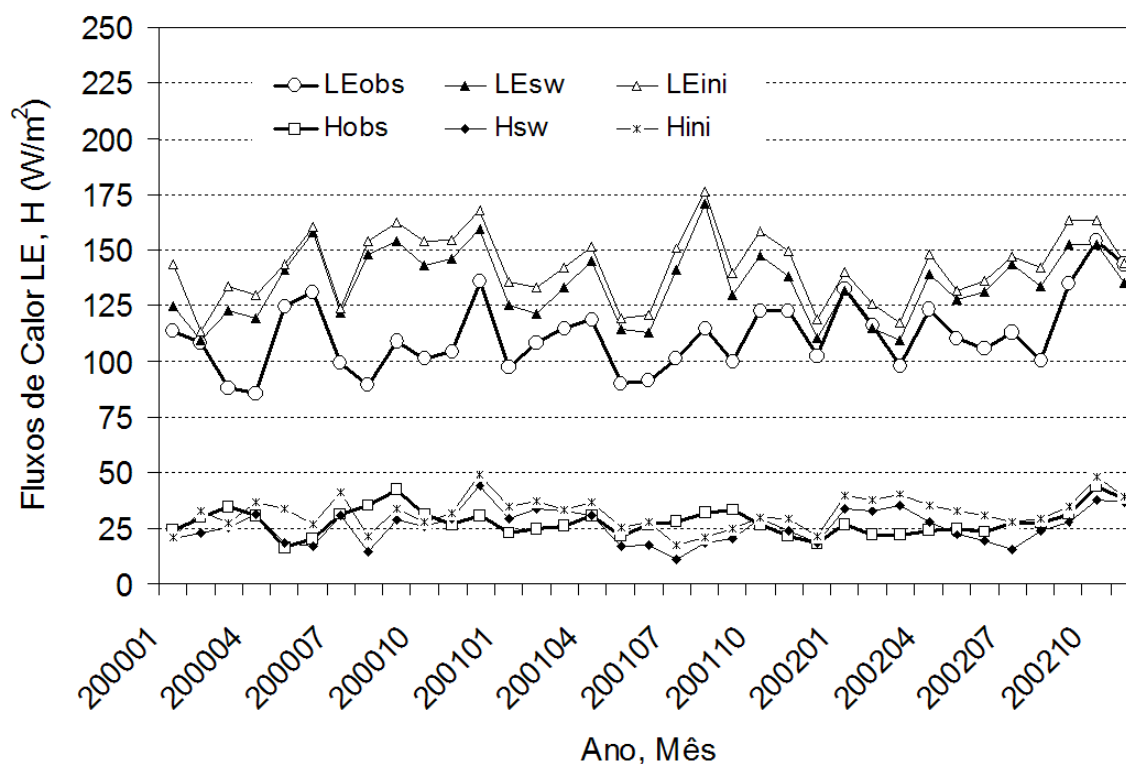


Figura 17: Variação da média mensal dos fluxos de calor latente e sensível observados e simulados nas condições INI e SW, no sítio de floresta, entre janeiro de 2000 e novembro de 2002.

A Figura 18 apresenta os fluxos de  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ) estimados nas simulações SW e INI e observados na área de floresta, considerando os valores médios mensais no período de janeiro de 2000 a novembro de 2002. Em termos de tendência da variação dos fluxos médios o modelo acompanha o comportamento observado. Indicando uma maior taxa de assimilação de carbono pela floresta no primeiro ano (2000), valor este que vai reduzindo até o final de 2002. Os padrões de alteração entre estação seca (onde a assimilação de carbono é reduzida), e a chuvosa (que apresenta aumento na assimilação de carbono) é também capturado pelo modelo, com magnitude bastante próxima a das medidas. As simulações que consideram a assimilação da umidade do solo apontam para uma melhora na estimativa do fluxo de  $\text{CO}_2$ , particularmente na estação seca.

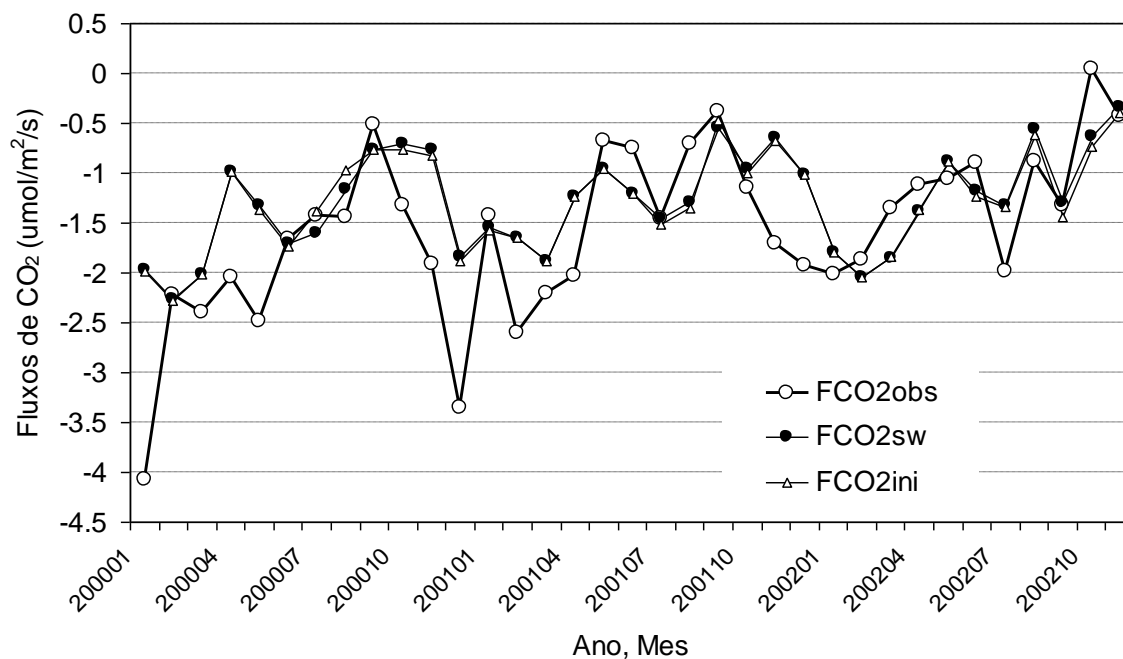


Figura 18: Variação da média mensal do fluxo de CO<sub>2</sub> observado e simulado (em μmol/m<sup>2</sup>/s) nas condições INI e SW, no sítio de floresta, entre janeiro de 2000 e novembro de 2002

## b) Sítio de Pastagem

A análise do comportamento dos fluxos de calor latente e calor sensível simulados em comparação com os observados no sítio de pastagem é apresentada na Figura 19. O modelo consegue reproduzir a variação e a magnitude dos fluxos ao longo do período 1999 a 2000 com maior precisão que nos anos seguintes. No ano de 2002 a magnitude do fluxo de calor latente simulado é superestimado, enquanto o fluxo de calor sensível mantém-se mais próximos dos valores observados. Nitidamente a variação dos fluxos observados apresentam oscilações relacionadas com a alteração da cobertura da superfície pelo pasto associado com a atividade de pastoril, ou seja, na alternância entre épocas de retirada e de introdução do gado no pasto. O índice de área foliar adotado foi mantido fixo ao longo de toda integração o que reduz a habilidade do modelo em representar a influência pastoril nos fluxos de calor e CO<sub>2</sub>. Para quantificar esse efeito, uma nova simulação foi conduzida, agora com o índice de área foliar monitorado no sítio de pastagem sendo assimilado pelo modelo. Os resultados para os fluxos de calor sensível e latente mostraram uma pequena melhora, porém, o fluxo de gás carbônico teve a qualidade dos resultados reduzida.

Adicionalmente à simulação que considera as raízes presentes em toda camada até 1m de profundidade foram realizadas simulações em que a profundidade e distribuição de raízes no solo



atigiram até a última camada. Estas simulações são representadas pelas várias curvas na figura 19. Em geral, a consideração de menos raízes superficiais na pastagem contribui para a redução do fluxo de calor latente (LEsim) e aumento do fluxo de calor sensível (Hsim). A assimilação da umidade do solo observada contribui para o melhor ajuste dos fluxos simulados com as observações (ver curva traçada forte na Figura 19).

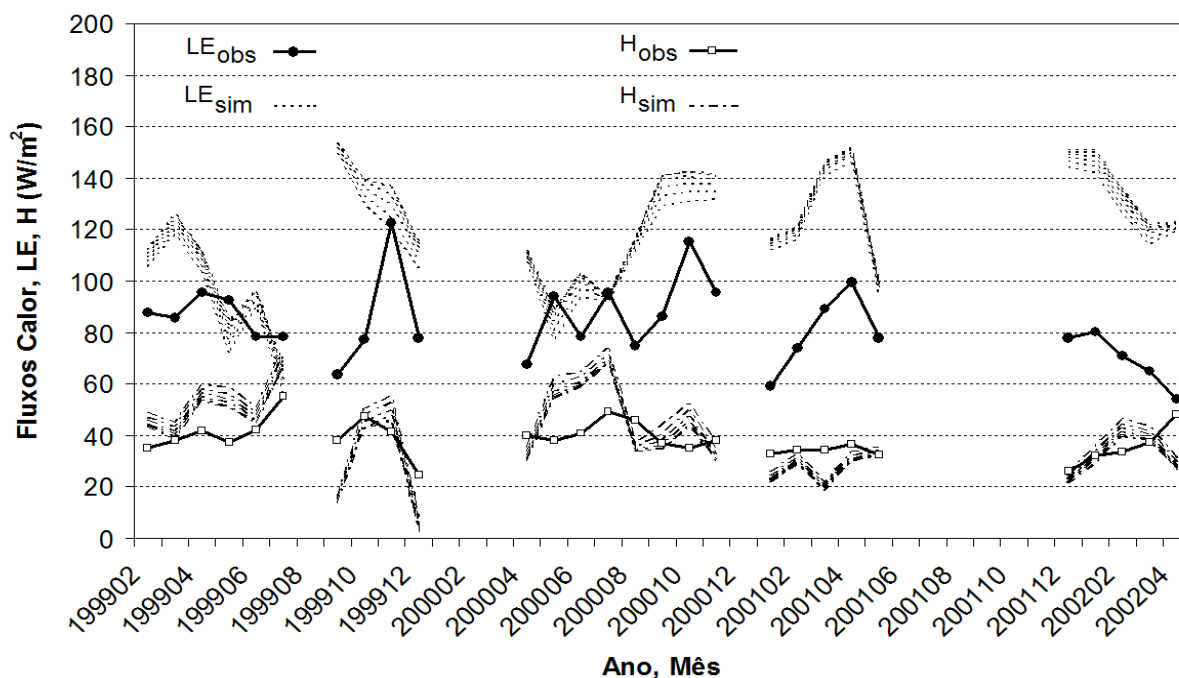


Figura 19: Variação da média mensal dos fluxos de calor latente e calor sensível observado e simulado (em  $W/m^2$ ), no sítio de pastagem, entre fevereiro de 1999 e novembro de 2002.

A Figura 20 apresenta os fluxos médios mensais de  $CO_2$  ( $FCO_2$ ) estimados nas simulações SW e INI em comparação com as observações obtidas na área de pastagem para o período de fevereiro de 1999 a março de 2002. Além destes, são também apresentados os termos de assimilação (AnSiB2) e respiração do ecossistema (resp\_ecoSib2) simulados e mais a respiração do solo obtida dos dados observados na mesma área e período por Zanchi *et al* (2006). Nitidamente, em alguns períodos, o modelo subestima o fluxo de  $CO_2$ , frente às observações. O modelo frequentemente gera condições de emissão de carbono na pastagem ao invés de assimilação, conforme apontam as observações. Para avaliar a contribuição dos termos de respiração do ecossistema e da fotossíntese separadamente, estas duas curvas são também apresentadas. Quando é analisada apenas a assimilação (comparar AnSiB2ini e AnSiB2sw com  $FCO_2$ obs) verifica-se uma inversão nas estimativas, onde o modelo apresenta fluxos mais intensos do que a observação. As estimativas do fluxo de  $CO_2$  se intensificam quando a umidade do solo é assimilada (comparar AnSiB2ini com AnSiB2sw), e reduz a discrepância entre modelo e observação.

Tipicamente o modelo representa a magnitude da respiração do ecossistema (resp\_ecoSib2) com valores entre 6 e 8  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Grande parte dessa respiração vem da componente do solo (efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo), e para comparação utilizou-se os dados observados de efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo de Zanchi (2004), obtidos na mesma área, e em um período contido na época em estudo. Estes dados mostram que o efluxo do solo tende a ser maior na época seca, e é reduzido na estação chuvosa com valores variando entre 2 e 6  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Ao considerar o efluxo do solo observado e mais a assimilação simulada pelo modelo ( $\text{AnSib2}_{\text{sw}} + \text{resp}_{\text{solo}}$ ), a troca líquida do ecossistema se aproxima mais do valor observado (curva em vermelho na Figura 20). Desta forma, melhorias na parametrização do efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo são também cruciais para a representação do fluxo de dióxido de carbono no ecossistema de pastagem. Mesmo com os erros sistemáticos o SiB2 captura as tendências das variações dos fluxos de  $\text{CO}_2$  associados aos períodos chuvoso e de estiagem no sítio de pastagem.

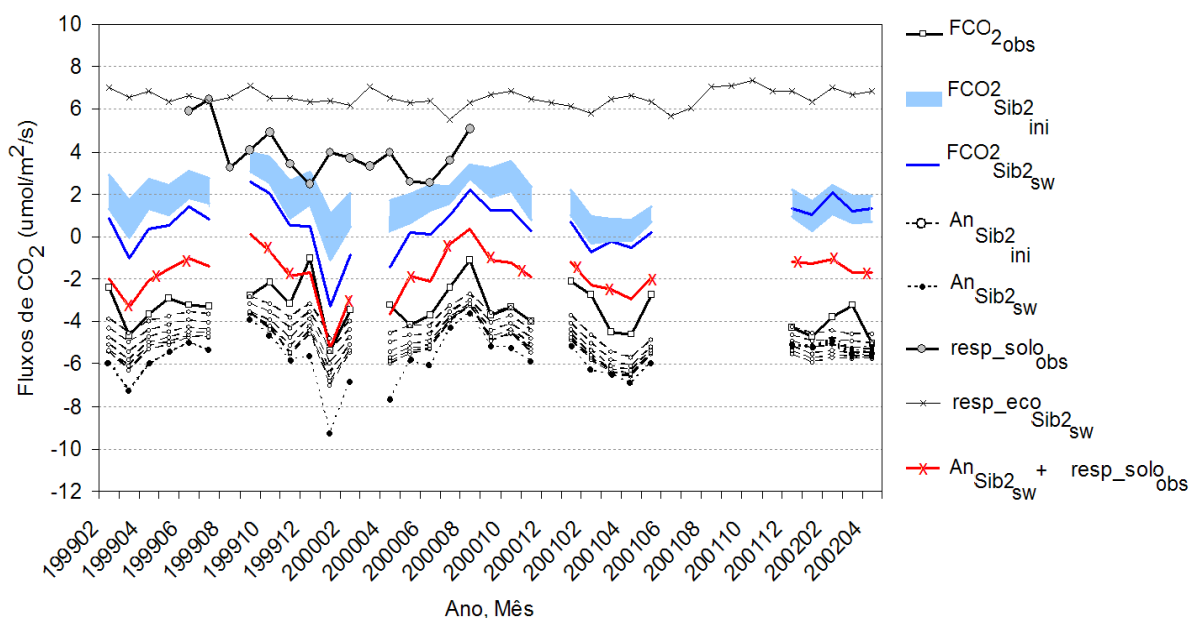


Figura 20: Variação da média mensal dos fluxos de  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ) observados (traço com bola aberta), simulados SW (traço fino) e INI (traço largo), assimilação modelada (traço tracejado com bola aberta) SW e (traço pontilhado com bola fechada) INI, respiração do solo observada (traço com quadrado), respiração do ecossistema modelado (traço fino com x), respiração do solo observado mais respiração do ecossistema modelado (traço largo com x) na área de pastagem para o período de fevereiro de 1999 a março de 2002.

### 3.2.4 Análise entre os sítios

As simulações apresentam resultados satisfatórios em ambos os sítios, mas o ajuste dos fluxos foi melhor no sítio de floresta. Isso é justificado pelo fato do ambiente de floresta ser bem conhecido do ponto de vista micrometeorológico, e os parâmetros já terem sido determinados localmente através de várias campanhas observacionais, particularmente na Amazônia (Gash *et al.* 1996).

O modelo SiB2 representa bem a estrutura de floresta especialmente quanto a umidade do solo observados e simulados, mostrando um bom comportamento para os dados de fluxos de calor sensível e latente e apresentando um ajuste mais fino do fluxo de gás carbônico na estação seca. Resultados encontrados por Imbuzeiro (2005) para o mesmo sítio, utilizando o modelo IBIS, mostram uma boa representação da variabilidade horária dos fluxos de calor sensível e calor latente e uma boa simulação para o fluxo de gás carbônico.

Para o sítio de pastagem o SiB2 indica uma tendência de superestimativa para o fluxo de calor latente ao longo do período das simulações, especialmente no ano de 2002. Para as simulações onde são informadas a profundidade e distribuição das raízes no solo, a diferença foi mínima com relação aos fluxos de calor latente e sensível, porém, capturam as variações do fluxo de gás carbônico, apesar dos erros sistemáticos apresentados pelo modelo.

O ambiente de pastagem, embora bastante estudado na Amazônia, apresenta características peculiares na sua representação, que ainda não foram calibradas localmente, como por exemplo, os parâmetros relacionados a resposta fisiológica a luz, temperatura e umidade do solo. Em geral, nem todos os parâmetros necessários à representação de um ecossistema são disponíveis ou gerados através de medidas locais. Neste estudo, as diferenças entre os fluxos simulados e observados têm origem em vários fatores: o primeiro diz respeito ao fechamento do balanço de energia que nas observações não ocorre. Mas que, para os modelos esta questão é crucial. Um segundo fator refere-se aos parâmetros utilizados. No caso da pastagem, a consideração de um índice de área foliar constante ao longo das integrações do modelo SiB2 contribuiu para que as alterações nos fluxos de superfície decorrentes das atividades pastoris não fossem totalmente representadas, mas nova simulação que considerou esta variação não foi suficiente para eliminar os erros de forma considerável. Isso indica a necessidade de outros estudos para este sítio. Ainda com relação aos parâmetros o modelo inclui o transporte de calor e umidade no perfil do solo e estes necessitam de informações sobre suas propriedades físicas, tais como, condutividade, difusividade térmica, porosidade, condutividade hidráulica entre outros. Em virtude da não disponibilidade de parâmetros medidos localmente, foram utilizadas relações empíricas baseadas na textura do solo, que também tem limitações ao considerar o solo

homogêneo. Desta forma, erros decorrentes desses parâmetros impactam o balanço de calor e água no solo e podem se propagar para a estimativa dos fluxos.

As incertezas nas próprias observações dos fluxos turbulentos (calor sensível, calor latente e fluxo de CO<sub>2</sub>) também contribuem para que ajustes de parâmetros nos modelos não sejam aplicáveis universalmente. Isto porque os modelos exigem que a energia que entra e sai de um determinado sistema seja conservada. Entretanto, as medidas dos fluxos turbulentos de energia nem sempre se ajustam às medições de energia disponível e o ajuste do modelo através dos parâmetros tem como referência as medidas de fluxos.

O critério do fechamento do balanço de energia é necessário, pois as medidas dos principais componentes do balanço de energia, feitas por instrumentos independentes, frequentemente não são consistentes com o princípio de conservação de energia. Resultados disponíveis na literatura têm mostrado que a soma dos fluxos de calor sensível e latente pelo método de covariância de vórtices turbulentos é, geralmente, menor que a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo (KUSTAS *et al.*, 1999; TWINE *et al.*, 2000). Nestas condições em que o fechamento do balanço de energia não é satisfeito, inconsistências são introduzidas nos fluxos turbulentos. Segundo Randow *et al.* (2004) o problema de fechamento do balanço de energia é maior na floresta, que na pastagem. O não fechamento do balanço de energia está relacionado aos fatos de que existem deficiências no sistema *eddy correlation* em capturar todas as perturbações e a diferença nas escalas de medidas entre os fluxos turbulentos de calor sensível e latente e os fluxos radiativos.

## 5. CONCLUSÕES

Em geral, os resultados simulados pelo modelo SiB2 se ajustaram bem aos dados observados no sítio de floresta, representando bem a variabilidade horária dos fluxos utilizados para validação dos resultados. Mostra-se que o conjunto de parâmetros disponíveis representa satisfatoriamente as condições de superfície encontradas nos dois sítios, particularmente quando é disponibilizado para o modelo os dados de umidade do solo.

O modelo é mais sensível na representação dos fluxos de calor sensível e latente para a floresta no período seco, devido a eficiência hídrica da floresta neste período. Erros na representação dos parâmetros físicos do solo, o não fechamento do balanço de energia para os dados observados, como também o tratamento das falhas dos dados meteorológicos observados, trazem um adicional de incerteza, mas que deve ter pouco peso nos resultados.

Os resultados mostram que apesar das dificuldades encontradas para configuração da estratégia de modelagem, atingiu-se uma boa representação das tendências de comportamento e aproximação em magnitude das trocas de fluxos de energia e CO<sub>2</sub> para o ecossistema de floresta. Enquanto que para a pastagem precisa-se investir em estudos que remetam a obtenção de parâmetros e refinamento de processos nos modelos, substituindo considerações empíricas por modelos estruturados fisicamente. De modo geral o modelo mostra-se útil como ferramenta para o preenchimento de falhas de fluxos de calor e dióxido de carbono em particular para a área de floresta

Do que foi exposto observa-se que pode-se lançar mão da modelagem climática como um instrumento para contribuir no incremento de projetos que viabilizem o desenvolvimento Regional e permitam aumentar os recursos de sustentabilidade na região.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R.G.; RANDOW, C.V.; FILHO, N. P.; MANZI, A. O.; AGUIAR, L. J. G. e CARDOSO, F. L. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, 36 -45, 2006.
- ANDREAE, M.O., Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. *Journal of Geophysical Research*. 107, D20, 8066 - 8091, 2002.
- ARAÚJO, A.; NOBRE, A.; KRUIJT, B.; ELBERS, J.; DELLAROSA, R.; P.STEFANI, RANDOW, C.; MANZI, O.; CULF, A.; GASH, J. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*. v. 107, n. D20, p. 29-1-29-20, 2002.
- AVISSAR, R.; DIAS, P. L. S.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C. A. The Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. *Journal of Geophysical Research*. 107, n. D20, p. 54.1-54.6, 2002.
- CHAMBERS, J.Q., HIGUCHI, K., TRIBUZY, E., TRUMBORE, S. Carbon sink for a century. *Nature*. 410, 429, 2001
- COX, R. M.; HYDE, M.; GATEHOUSE, S.; NOBLE, W.; DILLON, H.; BENTLER, R.; STEPHENS, D.; ARLINGER, MUNRO, K. J.; LUTMAN, M. E.S.; BECK, L.; ILKERSON, D.; KRAMER, S.; KRICOS, P.; GAGNÉ, J. P.; BESS, F.; HALLBERG, L. Optimal outcome measures, research priorities, and international cooperation. *Ear Hear*. v. 21, n. 4, p. 106S-115S, 2000.
- CULF, A.D.; ESTEVES, J.L.; FILHO, A. de O Marques; ROCHA, H.R. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. *Amazon Deforestation and Climate*, eds. J.C.H. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts and R. Victória. John Wiley and Sons, Chichester, UK, p.175-192, 1996.
- CULF, A.D.; FISCH, G.; MALHI, Y.; NOBRE, C. A. The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest. *Agricultural and forest Meteorology* 85, 149 -158, 1997.
- FAN, S.M.; WOFSY, S.C.; BAKWIN, P.S.; JACOB, D.J. **Atmosphere-biosphere exchange of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in the central amazon forest.** *Journal of Geophysical Research*, **95 (D10)**: 16851-16864, 1990.
- FEARNSIDE, PHILIP M., Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazônica* 36, 395 – 400, 2006.
- GASH, J.C.; NOBRE, C.; ROBERTS, J.; VICTORIA, R. An overview of ABRACOS. *Amazonian Deforestation and Climate*, John Wiley & Sons Ltd, New York, p. 1-14. 1996
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; WRIGHT, I.; GASH, J. Fluxes of carbon dioxide and water

vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. **Glob. Change Biol.** v.1, 1-12, 1995

GRACE, J.; LLOYD, J.; MCLNTYRE, J.; MIRANDA, A. C.; MEIR, P. e MIRANDA, H. S. Carbon dioxide flux over Amazon rainforest in Rondônia. **Amazonian Deforestation and Climate**. 17, 307-318, 1996.

HODNETT, M. G.; OYAMA, M. D.; TOMASELLA, J.; MARQUES FILHO, A. O. Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. (Eds). **Amazonian Deforestation and Climate**, 3, 57-77, 1996.

IMBUZEIRO, HEMLEIY MARIA ACIOLI. **Calibração do modelo IBIS na floresta Amazônica usando múltiplos sítios**. Tese(Meteorologia agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

IPCC 2007. Climate Change: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report, Paris, France, 2007.

KUSTAS, W.P., NORMAN, J.M. “Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover.” **Agric. For. Meteorol.** , , **94**: 13-29. 1999.

MALHI, Y.; NOBRE, A.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal Of Geophysical Research** 103, 593-612, 1998.

MARENGO, JOSÉ A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon river basin water budget, **Climate Dynamics**, 2005.

NOBRE C. A.; FISCH, G.; ROCHA, H. R.; LYRA, R.F.F.; ROCHA, E.P.; COSTA, A.C.L.;UBARANA,V. N. Observation of the atmospheric boundary layer In Rondônia In: J.H.C. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts and R.L. Victoria (Eds). **Amazonian eforestation and Climate**, J. Wiley and Sons, New York, p.413-424. 1996.

OMETTO, J. P.; NOBRE, A. D.; ROCHA, H.; ARTAXO,P. e MARTINELLI, L. Amazônia and the Modern Carbon Cycle: Lessons Learned. **O ecologia**. 3,5-34, 2005.

PHILLIP, M. F. Phosphorus in plant biology: regulatory roles in molecular, cellular,rganismic ond ecosystem processes, **University Park**, 28 – 30, 1998.

PRENTICE, I. C.; LLOYD, J. C-quest in the Amazon basin. **Nature**, v. 396, n. 619- 620, p. 319-320, 1998.

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; CARDOSO, F. L. e KABAT, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in south west Amazônia. **Theoretical and applied climatologi**, 2004

ROCHA, H. R. ; SELLERS, P. J. ; COLLATZ, J. G. ; WRIGHT, I. R. ; GRACE, J. Calibration and use of the SiB2 model to estimate water vapour and carbon exchanges in the Abracos forest sites. In: J Gash; C A Nobre; J M Roberts; R Victoria. (Org.). **Amazon deforestation end climate change**. 1 ed. Chichester, v. 1, p. 459-472, 1996.

ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C. ; PINTO, L. D. V. O. ; MENTON, M. ; GOULDEN, M.; MILLER, S. Figueira. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. **Ecological applications**. EUA, v. 14, n. 4, p. S22-S32, 2004.

RORIZ, MAURÍCIO. Um algoritmo para determinar os valores horários das temperaturas do ar em função das normais climatológicas. **II Conferência regional Latinoamericana de la ISES**. Buenos Aires, Argentina, 2006.

SANTOS, A.J.B. **Comparação dos fluxos de energia, água e carbono entre áreas de campo sujo queimado e não queimado**. 2004. 57 f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SALESKA, SCOTT R.; MILLER, SCOTT D.; MATROSS, DANIEL M.; GOULDEN, MICHAEL L.; WOFSEY, STEVEN C.; ROCHA, HUMBERTO R. ; CAMARGO, PLINIO B. DE; CRILL, PATRICK; DAUBE, BRUCE C.; FREITAS, HELBER C.; HUTYRA, LUCY; KELLER, MICHAEL; KIRCHHOFF, VOLKER; MENTON, MARY.; MUNGER, J. WILLIAM; PYLE, ELIZABETH HAMMOND; RICE, AMY H., AND SILVA, HUDSON. Carbon in Amazon Forests: Unexpected Seasonal Fluxes and Disturbance-Induced Losses. **Science**. Vol. 302. no. 5650, pp. 1554 – 1557, 2003.

SELLERS, P.J.; RANDALL, D.; COLLATZ, C.; BERRY, J.; FIELD, C.; DALZICH, D.; ZHANG, C. & COLLELO, G. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation. **Journal of Climate**. 9, 676-705, 1996.

TIAN, H.; MELLILO, J.M.; KICKLIGHTER, D.W.; MCGUIRE, A.D.; HELFRICH III, J.V.K.; MOORE III, B.; VOROSMARTY, C.J.. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. **Nature** 396, 664-667, 1998.

TWINE TE, KUSTAS WP, NORMAN JM, COOK DR, HOUSER PR, MEYERS TP, PRUEGER JH, STARKS PJ, WESELY ML Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agric Forest Meteorol** 103: 279–300, 2000.

VOURLITIS GL, PRIANTE-FILHO N, HAYASHI MMS, NOGUEIRA JS, CASEIRO FT, CAMPELO JH Seasonal variations in the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a mature amazonian tropical transitional forest (cerradão). **Funct Ecol** 15:388–395, 2001.

ZANCHI, FABRÍCIO BERTON; WATERLOO, MAARTEN J.; ROCHA, HUMBERTO R. DA; AGUIAR, LEONARDO J. G.; RANDOW, CELSO VON; KRUIJT, BART, CARDOSO, FERNANDO L.; MANZI, ANTÔNIO O.. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta amazônica**, 2006 submetido.

ZANCHI, FABRÍCIO BERTON. **Medição do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo com câmaras automáticas sobre floresta em Rondônia**. Dissertação de mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

WRIGHT, I.R.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; ROCHA, H.R. DA; ROBERTS, J.M.; VERTAMATTI, E.; CULF, A.D.; ALVALÁ, R.C.S.; HODNETT, M.G.; UBARANA, V. Towards a GCM parameterization for Amazonia. **Amazon Deforestation and Climate**, 28, 473-504, 1996.