



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA**

# **BALANÇO DE ENERGIA EM ÁREAS DE FLORESTA E DE UM CAMPO AGRÍCOLA NO LESTE DA AMAZONIA**

**WILDERCLAY BARRETO MACHADO**

**Santarém, Pará  
Março, 2012**

**WILDERCLAY BARRETO MACHADO**

**BALANÇO DE ENERGIA EM ÁREAS DE FLORESTAS E DE  
UM CAMPO AGRÍCOLA NO LESTE DA AMAZONIA**

**ORIENTADOR: Dr. RODRIGO DA SILVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Recursos Naturais da Amazônia, junto ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Recursos Naturais da Amazônia.

**Santarém, Pará  
Março, 2012**

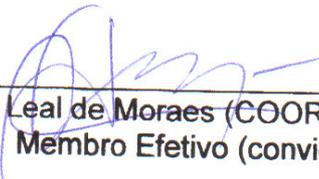
**WILDERCLAY BARRETO MACHADO**

**BALANÇO DE ENERGIA EM ÁREAS DE FLORESTA E DE  
UM CAMPO AGRÍCOLA NO LESTE DA AMAZÔNIA**

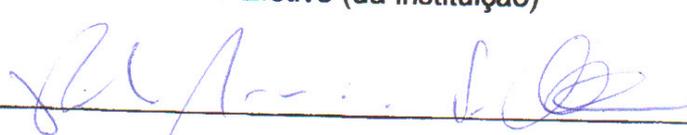
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Recursos Naturais da Amazônia. Aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Recursos Naturais da Amazônia, nível de mestrado, da Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, em 30 de março de 2012.

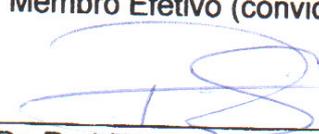
Dr<sup>a</sup>. Rosa Helena. V. Mourão (UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ)  
Coordenadora

Apresentada à Comissão Examinadora, integrada pelos Professores:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Osvaldo Luis Leal de Moraes (COORDENADOR do CPTEC)  
Membro Efetivo (convidado)

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Maria Cristina Andres Arbage (PRÓDOC-CAPES)  
Membro Efetivo (da instituição)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Paulo Afonso Fischer Kuhn (UFPA)  
Membro Efetivo (convidado)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Rodrigo da Silva (UFOPA)  
Orientador Membro

Santarém, 30 de Março de 2012.

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Gestão da Informação-SIGI/UFOPA**

---

- M151b Machado, Wilderclay Barreto  
Balanço de energia em áreas de floresta e de um campo agrícola no leste da Amazônia / Wilderclay Barreto Machado. – Santarém, 2012.  
65 f.: il.  
Inclui bibliografias.
- Orientador Rodrigo Silva.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Santarém, 2012.
1. Balanço de energia - Amazônia. 2. Micrometeorologia - Amazônia. 3. Climatologia. 4. Turbulência atmosférica – Amazônia. 5. Santarém (PA). I. Silva, Rodrigo, orient. II. Título.

CDD: 21. ed. 551.50981

---

*Aos meus amados pais Luiz Paulo e Maria Cristina;  
Aos meus queridos irmãos Wilderlan e Wirllene;  
À minha querida sobrinha Lívia;  
Especialmente à minha adorável e amada Glimária.*

***DEDICO***

**AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Rodrigo da Silva, pela dedicação e pelos esforços empregados para que este trabalho se concretizasse; pelas experiências compartilhadas através de sua orientação atenciosa dinâmica e descontraída; pela minha iniciação na área de micrometeorologia, sobretudo por sua amizade e seus maravilhosos churrascos que só um gaúcho nato saberia fazer.

Não devo deixar de agradecer aos meus amigos Antônio Paulo, Raphael Pablo, Miércio Junior e Diego Aguiar e meus colegas de mestrado do PGRNA pelo apoio e amizade.

E agradeço à FAPESPA pela Bolsa de mestrado e à UFOPA pelo auxílio financeiro.

Agradeço ainda ao Programa LBA (Programa de Grande Escala da Biosfera Atmosfera na Amazônia) pela disponibilidade dos dados e apoio logístico para a concretização desse trabalho.

A meus pais Luiz Paulo Machado e Maria Cristina pela confiança e suporte de todos esses 27 anos que já se foram. Aos meus irmãos Wirllene e Wilderlan, que acompanham e apoiam minha trajetória em busca do conhecimento científico.

E, especialmente, à minha querida noiva, Glimária Aflalo, pelo incentivo, companheirismo, paciência, carinho e, acima de tudo, por seu amor dedicado.

MACHADO, Wilderclay Barreto. **Balço de energia em áreas de floresta e de um campo agrícola no leste da Amazônia.** 2012. 66 páginas. Dissertação de Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, 2012

## RESUMO

Este estudo está baseado nas observações e dados medidos pela rede de torres micrometeorológicas instaladas nos sítios experimentais do programa LBA na região de Santarém. As torres de fluxos estão localizadas, duas dentro da Floresta Nacional do Tapajós, uma em área de manejo madeireiro (83 km) e outra em área de floresta primária (67 km), a terceira torre de fluxo está instalada em uma área agrícola nas proximidades do km 77 ao longo da BR 163. Este trabalho objetivou analisar o balanço de energia em termos das suas partições, ou seja, os fluxos turbulentos de calor sensível ( $H$ ) e calor latente ( $LE$ ), o fluxo de calor no solo ( $G$ ) e do armazenamento de energia na biomassa ( $S$ ), utilizando os dados das torres de fluxos dos sítios experimentais do Programa LBA em Santarém-PA, sobre diferentes condições de superfície (Campo Agrícola, Floresta Manejada e Floresta Primária). Para isso, foram estimados os fluxos de calor latente ( $LE$ ) e calor sensível ( $H$ ), o saldo de radiação ( $Q^*$ ), o fluxo de calor no solo ( $G$ ) e Taxa de armazenamento de energia no ar e na biomassa ( $S$ ). Através dos resultados verificou-se que, diferente do campo agrícola, a variação do albedo na floresta manejada estava associada com os efeitos da sazonalidade com maiores valores nos períodos menos chuvosos e menores valores nos mais chuvosos. Com relação ao  $Q^*$ , verificou-se que tanto na Floresta Manejada quanto na Floresta Primária foram maiores em até em média 2,5% a mais em relação ao Campo Agrícola. A respeito das componentes do balanço de energia, o fluxo de calor no solo ( $G$ ) foi um termo considerável no Fechamento do Balanço de Energia Superficial (FBES) em área de Campo Agrícola. Já em áreas de Floresta,  $S$  foi um termo considerável no FBES. O fluxo de  $LE$  foi dominante por todo período analisado em áreas de florestas, exceto no Campo Agrícola, onde se verificou uma inversão nos fluxos de  $LE$  e  $H$ , principalmente em no período em que o solo se encontrava com arado e abandonado para regeneração, culminando com período menos chuvoso. O FBES foi melhor quando se incluiu  $S$  nos cálculos principalmente em áreas de floresta

**Palavra-chave:** Balanço de Energia, Fluxos turbulentos de energia, Física da Atmosfera

MACHADO, Wilderclay Barreto. **Balço de energia em áreas de floresta e de um campo agrícola no leste da Amazônia.** 2012. 66 páginas. Dissertação de Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, 2012

## ABSTRACT

This study is based on observations and data measured by the network micrometeorological towers installed in the experimental sites LBA in the region of Santarém. The fluxes towers are located two within the Tapajos National Forest (TNF), an area in for management forest (km 83) and one in Primary forest area (km 67), the third flux tower is installed in an agricultural area in of 77 km along the BR 163. The objective this work was to evaluate the surface energy balance in the experimental site LBA in Santarém-PA on different regions (Agricultural Field, management and Primary Forest). To this was estimated latent heat flux ( $LE$ ) and sensible heat flux ( $H$ ), net radiation ( $Q^*$ ), the of ground heat flux ( $G$ ), energy storage rate in the air and biomass ( $S$ ). Through these results it was found that, different from the agricultural field, the variation of albedo in the management forest was associated with the effects seasonality with higher values in the dry season, and lower values in the wettest. About to the  $Q^*$ , for areas of forest (managed and primary) we found that  $Q^*$  was 2,5% higher than in agricultural field. Regarding the components of the energy balance, the flux of heat in the ground ( $G$ ) was a term considerable Surface Energy Balance closure in Agricultural Field area. Already in forest areas,  $S$  was a considerable surface energy balance closure term. The  $LE$  flux was dominant throughout the period analyzed in forest areas, except in the Agricultural Field, where found a reversal in the  $LE$  and  $H$  fluxes, especially in the period in which the soil was plowed and abandoned for regeneration, culminate in less rainy season. The Surface Energy Balance closure was better when  $S$  is included in the calculations especially in areas forest.

**Keyword:** Energy Balance, Energy turbulent fluxes, Physics of the Atmosphere.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE SIGAS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Estimativas de fluxos turbulento de energia.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Balanço radiativo.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Balanço de energia na superfície.....</b>	<b>10</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Locais de estudos e conjuntos de dados.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Instrumentação e Aquisição de dados.....</b>	<b>17</b>
3.2.1 Campo Agrícola (km 77).....	17
3.2.2 Floresta manejada (km 83) .....	19
3.2.3 Floresta primária (km 67) .....	22
<b>3.3 Estimativas de variáveis.....</b>	<b>24</b>
3.3.1 Estoque de calor na biomassa.....	24
3.3.2 Análises estatísticas.....	24
3.3.3 Fração de energia .....	25
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Componentes do Saldo de Radiação.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Fluxo de calor sensível (<math>H</math>).....</b>	<b>29</b>
<b>4.3 Fluxo de calor latente (<math>LE</math>) .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4 Variação horária da taxa de armazenamento de energia térmica (TAE) para o Campo Agrícola ( km 77), Floresta Manejada (km 83) e Primária (km 67).....</b>	<b>34</b>
<b>4.5 Fluxo de energia.....</b>	<b>37</b>

<b>4.6 Fração de Energia .....</b>	<b>39</b>
<b>4.7 Fechamento do Balanço de Energia Superficial (FBES).....</b>	<b>41</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>47</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Condições de superfície entre os anos de 2000 a 2005 .....	16
<b>Tabela 2</b> – Instrumentação de campo na Fazenda Paraíso (km77).....	18
<b>Tabela 3</b> – Instrumentação de campo na Floresta (km83).....	22
<b>Tabela 4</b> – Instrumentação de campo na Floresta (km67).....	23
<b>Tabela 5</b> - Médias diárias de Saldo de radiação de onda curta ( $S^*$ ) e saldo de radiação de onda longa ( $L^*$ ), e médias mensais do saldo de radiação ( $Q^*$ ) fluxo de calor de sensível ( $H$ ), fluxo de calor latente ( $LE$ ), Temperatura do ar (Tar) Umidade do solo (Usolo).....	30
<b>Tabela 6</b> - Taxas (%) envolvendo $S$ , $Sar$ , $Str$ , $Sum$ e $Q^*$ , mais acumulação de precipitação pluviométrica $P$ (mm), para Campo Agrícola (km77), Floresta Manejada (km83) e Primária (km67).....	35
<b>Tabela 7</b> - Médias horárias de Saldo de radiação ( $Q^*$ ), fluxo de calor latente ( $LE$ ), fluxo de calor de sensível ( $H$ ), Fluxo de calor no solo e Energia Armazenada ( $S$ ) para os três sítios.....	39
<b>Tabela 8</b> - Variação horária da fração de ( $H/Q^*$ ), ( $LE/Q^*$ ), ( $G/Q^*$ ) e ( $S/Q^*$ ) para (a) Campo Agrícola, Floresta Manejada e Floresta Primária.....	41
<b>Tabela 9</b> - Fechamento do Balanço de Energia Superficial (FBES), imprecisão e valores residuais para os três sítios.....	43

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Processo de cascata de elementos turbulentos (adaptado de Fisch, 1995) note que a diminuição dos tamanhos dos elementos é contínua.....	4
<b>Figura 2</b> - Diagrama esquemático da distribuição anual média da energia solar no sistema Terra-Atmosfera, onde os valores são expressos como percentagens da média anual de radiação incidente no topo da atmosfera $\overline{K_i}$ . Adaptado de Oke (1987). ....	8
<b>Figura 3</b> - Valores médios dos componentes do balanço de radiação de onda curta (adaptado de Acevedo, 2003). ....	8
<b>Figura 4</b> - Componentes do balanço radiativo em 30 de julho de 1971, em Matador, Saskatchewan (50° N), Canadá (adaptado de Oke ,1987) .....	9
<b>Figura 5</b> - Esquema de processos de interação entre a superfície-atmosfera. Adaptado de BETTS et al (2010).....	11
<b>Figura 6</b> - Componentes de energia. Fonte: adaptado de Augusto Michiles. ....	12
<b>Figura 7</b> - Período do conjunto de dados para os três sítios. Integrados ao projeto CD-32 do LBA.....	15
<b>Figura 8</b> - Localização dos sítios de pesquisa (cortesia: Rodrigo da Silva) .....	16
<b>Figura 9</b> - Torre micrometeorológica na fazenda Paraíso. ....	17
<b>Figura 10</b> - O esboço do sitio km 83 na Floresta Nacional do Tapajós (FNT), Pará, Brasil. A área abrange aproximadamente 700 ha da porção de 3200 ha de concessão de corte que foi programada para corte entre setembro a dezembro de 2001. A localização da torre de fluxo está marcada pela letra "T" no bloco 10b. Adaptado de Figueira et al. (2008) .....	20
<b>Figura 11</b> - Árvores marcadas com faixas dendrometrias antes do corte em Novembro de 2000 são mostrada como pontos sólidos. Aberturas (gap) criadas pelo corte seletivo em Setembro de 2001 são mostrados como forma irregular. Os <i>plots</i> no transecto 25 N-S estão numerado de 0 a 24 e os de 13 L-O por letras “A” a “M”. A Torre de fluxo está indicada no bloco G4.....	21
<b>Figura 12</b> –Floresta manejada: a) perfil da torre e b) visão da torre. ....	21
<b>Figura 13</b> – Oeste do Pará (Santarém) – km 67, torre do sitio da floresta primária: a) perfil da torre; b) abrigo dos instrumentos de controle climáticos e c) visão da torre. ....	23
<b>Figura 14</b> – Variação diária e mensal de $S^*$ , $L^*$ e $Q^*$ para Campo Agrícola (a e c); Floresta Manejada (b e d) e Floresta Primária (e). ....	27

<b>Figura 15</b> – Variação diária do albedo para (a) Campo Agrícola e b) Floresta Manejada.....	28
<b>Figura 16</b> – Variação diária e mensal de $H$ e Temperatura do ar para Campo agrícola ( <b>a e d</b> ); Floresta Manejada ( <b>b e e</b> ) e Floresta Primária ( <b>c e f</b> ) .....	30
<b>Figura 17</b> – Variação diária e mensal de $LE$ , Umidade do solo e Acumulo de precipitação para Campo agrícola ( <b>a e d</b> ); Floresta Manejada ( <b>b e e</b> ) e Floresta Primária ( <b>c e f</b> ).....	32
<b>Figura 18</b> – Variação horária da TAE do ar $S_T$ e $S_q$ , do tronco ( $S_{tr}$ ) e do restante da biomassa ou $S_{um}$ ( $S_g, S_r, S_{lt}, S_f$ e $S_{oc}$ ) para o ( <b>a</b> ) Campo Agrícola; ( <b>b</b> ) Floresta Manejada e ( <b>c</b> ) Floresta Primária. ....	35
<b>Figura 19</b> – Variação horária de $Q^*$ , $LE$ , $H$ , $G$ , $S$ e $(LE+H+G+S)$ para ( <b>a</b> ) Campo Agrícola; ( <b>b</b> ) Floresta Manejada e ( <b>c</b> ) Floresta Primária. ....	37
<b>Figura 20</b> - Variação horária da fração de $(H/Q^*)$ , $(LE/Q^*)$ , $(G/Q^*)$ e $(S/Q^*)$ para ( <b>a</b> ) Campo Agrícola; ( <b>b</b> ) Floresta Manejada e ( <b>c</b> ) Floresta Primária. ....	49
<b>Figura 21</b> – Variação horária residual entre $Q^*$ e somatória dos fluxos de energia incluindo e não incluindo $S$ ( <b>+S</b> e <b>-S</b> ), para (a) Sitio do Km77; (b) Km83 e (c) Km67. ....	41
<b>Figura 22</b> – Regressão linear entre os valores horários da somatória do fluxo incluindo e não incluindo $S$ para o Campo Agrícola ( <b>a e d</b> ); Floresta Manejada ( <b>b e e</b> ) e Floresta Primária ( <b>c e f</b> ).....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

ADV – Advecção,  $W.m^{-2}$ .

$\alpha\bar{b}$  – Albedo, %.

$\beta$  – Constante de ajuste da atenuação da onda da temperatura da biomassa, adimensional.

$C_p$  - Calor específico do ar,  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ .

$C_g$  – Calor específico dos galhos,  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ .

$C_r$  - Calor específico dos ramos,  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ .

$C_f$  - Calor específico das folhas,  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ .

$\Delta z$  - Variação de altura, m.

$\Delta\bar{q}$  - Variação da umidade específica do ar,  $g.kg^{-1}$ .

$E$  - Energia radiativa,  $W.m^{-2}$ .

$\varepsilon$  - Emissividade de um corpo qualquer, adimensional.

$G$  – Fluxo de calor no solo,  $W.m^{-2}$ .

$H$  – Fluxo de calor sensível,  $W.m^{-2}$ .

LE – Fluxo de calor Latente,  $W.m^{-2}$ .

$L^*$  - Saldo de radiação de ondas longas,  $W.m^{-2}$ .

$L_{\downarrow}$  - Radiação de ondas longas emitida da atmosfera para a superfície,  $W.m^{-2}$ .

$L_{\uparrow}$  - Radiação de ondas longas emitida da superfície para a atmosfera,  $W.m^{-2}$ .

$\lambda$  - Calor latente de evapotranspiração,  $J.kg^{-1}$ .

$m_g$  - Massa dos galhos, kg.

$m_r$  - Massa dos ramos, kg.

$m_{lt}$  - Massa da liteira, kg.

$m_f$  - Massa das folhas, kg.

$m_{oc}$  – Massa dos outros componentes, kg.

$\mu C$  – Energia utilizada no processo fotossintético,  $W.m^{-2}$ .

$\Theta$  - Umidade do solo,  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

P - Pressão do ar; mBar.

$Q^*$  - Saldo de Radiação,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$q_i$  – Umidade específica do ar numa camada i qualquer,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

$q'$  - Flutuação da umidade específica,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

$\rho$  - Massa específica do ar,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

$S_{tr}$  - Energia armazenada nos troncos,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Sum – Energia armazenada nos galhos, ramos, folhas, liteira e outros componentes;  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$\overline{S}_i$  - Índice da média do saldo de radiação de ondas curtas,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S^*$  - Saldo de radiação de ondas curtas,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S^*_{\text{nuvens}}$  – Absorção de radiação de ondas curtas pelas nuvens,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S^*_{\text{atm}}$  - Absorção de radiação de ondas curtas pela atmosfera,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S^*_{\text{Terra}}$  - Absorção de radiação de ondas curtas pela Terra,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S_{\uparrow\text{Terra}}$  – Radiação de ondas curtas refletida pela Terra,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S_{\uparrow\text{atm}}$  - Radiação de ondas curtas refletidas pela atmosfera,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S_{\uparrow\text{nuvens}}$  - Radiação de ondas curtas refletidas pelas núvens,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$S_{ar}$  - Energia Armazenada o ar,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzmann,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

$T_v$  – Temperatura sônica, K.

$T_k$  – Temperatura do Ambiente, K.

$T_i$  – Temperatura do ar numa camada i qualquer, °C.

$T_{\text{sônica}}$  - Temperatura sônica do ar, K.

$T_{\text{sonica}}$  - Temperatura do ar derivado da velocidade do som; K

$T_{ar}$  - Temperatura do ar;

$T'$  - Flutuação da temperatura do ar, °C.

$U_x$  - Componentes da velocidade do vento em x;

$U_y$  - Componentes da velocidade do vento em y.

$U_z$  - Componentes da velocidade do vento em z;

UR - Umidade relativa do ar, %.

$U_{ri}$  - Umidade relativa numa camada i qualquer, %.

WS - Velocidade do vento,  $m.s^{-1}$

WD - Direção do vento, graus.

$\overline{w'}$  - Média da flutuação da velocidade do vertical do vento,  $m.s^{-1}$ .

$\overline{w}$  - Média da Velocidade do vertical do vento,  $m.s^{-1}$ .

$w$  - Velocidade vertical do vento,  $m.s^{-1}$ .

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARME - Amazon Region Micrometeorology Experiment.

ABLE2 - Amazon Boundary Layer Experiment 2.

ABRACOS - Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study

ANOVA – Análise de Variância.

CLA – Camada Limite Atmosférica

DAP – Diâmetro a Altura do Peito,

ECT – Energia Cinética Turbulenta.

EUROFLUX - projeto de três anos que coletaram medidas de fluxos de dióxido de carbono, vapor de água, e troca de energia em uma variedade de sites na Europa.

FBES - Fechamento do Balanço de energia superficial.

$FE_{LE}$ - Fração de energia utilizada no fluxo de calor latente.

$FE_H$ - Fração de energia utilizada no fluxo de calor sensível.

$FE_G$  - Fração de energia utilizada no fluxo de calor do solo.

$FE_S$  - Fração de energia utilizada no armazenamento no ar e na biomassa

FLUXNET - rede global de sites torre micrometeorológica que usam métodos de covariância de vórtices turbulentos para medir as trocas de dióxido de carbono, vapor de água e energia entre a biosfera e a atmosfera.

FNT – Floresta Nacional do Tapajós.

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças climáticas.

LBA – Programa de Larga escala da Biosfera-atmosfera na Amazônia

TAE – Taxa de Armazenamento de Energia Térmica.

ZF2 – Reserva Biológicas do Cuieiras, na Amazônia Central, 50 km à noroeste de Manaus, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Inúmeras atividades econômicas estão adentrando na região Amazônica, provocando alterações que tornam imprevisíveis a intensidade dos impactos causados por esse novo ciclo de produção. O avanço da fronteira agrícola sobre áreas naturais, removendo a cobertura vegetal natural, e mesmo o impacto da utilização de novas técnicas de produção e novas formas de manejo tem consequências imprevisíveis nos processos conduzidos por microorganismos e pelas novas formas de cultura que se estabelecem dentro da região.

Segundo Betts et al. (2008), a principal ameaça para a floresta Amazônica é o desmatamento e a expansão do fogo pela agricultura. Em 2001 aproximadamente 837000 km<sup>2</sup> de floresta amazônica havia sido desmatado, cerca de 13% da sua extensão original (6,2 milhões km<sup>2</sup>), com taxas de 25000 km<sup>2</sup> por ano em 1990. Aproximadamente 80% deste desmatamento têm sido no Brasil, por conta de expansão de rodovias entre as regiões de fronteiras de florestas, sem nenhum acompanhamento planejado de rodovias, por criações de gados e, mais recente, por produtores de arroz e soja.

O arroz de sequeiro, ou de terra firme, responde por mais de 95% da produção de arroz no Pará, principalmente nas microrregiões geográficas localizadas no oeste paraense (Óbidos, Santarém, Itaituba e Altamira) foram responsáveis por 21% dessa produção segundo Lopes e Correa (2002). Nessas microrregiões, predomina a cultura do arroz em terra firme, sob o regime de “sequeiro-favorecido”, por causa do alto índice pluviométrico que, em média, é de 2000 mm por ano. Em 1990 e 2003 a produção de arroz em casca no Pará, subiu de 148 mil toneladas para 502 mil toneladas, correspondendo num crescimento de 340%, cuja área colhida passou de 1270 km<sup>2</sup> para 2540 km<sup>2</sup>, o que significa um incremento de 100%.

No contexto amazônico, segundo Malhi et al. (2008), o maior agente de mudança ocasionado pela mudança do uso da terra está mais ligado a diminuição da precipitação do período seco. Dos 23 modelos climáticos globais empregados pelo IPCC, em 2007, 50-70% predisseram uma substancial redução nos índices pluviométricos (acima de 20%) no período seco no leste da Amazônia sob cenário de gases de efeito estufa, 40% na Amazônia Central e 20% na ocidental. Além disso, redução da cobertura florestal leva a mudanças no processo de evaporação e do balanço de energia superficial, que promove a redução da precipitação no interior do país (Betts et al., 2008).

Mudanças ambientais atuais podem afetar negativamente os seres humanos na Amazônia e em outros locais. Estas mudanças incluem a perda da capacidade produtiva dos ecossistemas, redução de ciclagem d'água devido à perda de evapotranspiração, com perda

consequente de precipitação, tanto na Amazônia como nas partes não amazônicas do Brasil que atualmente sofrem de precipitação insuficiente (Fearnside, 2003).

Essas alterações no meio ambiente, também afetam a magnitude e a dinâmica das trocas de energia, massa e momentum que ocorrem entre a superfície e a atmosfera (Gioli *et al.*, 2004 *apud* Aguiar, 2005). A quantificação da densidade dos fluxos dos componentes do Balanço de Energia no nível do dossel permite avaliar importantes interações da vegetação com a atmosfera. E auxilia no entendimento dos processos de transferência de energia para a evapotranspiração (calor latente) e mudança de temperatura (calor sensível) do ar e do solo para uma vegetação sob certas condições ambientais (Meirelles, 2003).

Os primeiros estudos de gases traços usando a Covariância de Vórtices Turbulentos (CVT), também conhecida como Eddy covariance foram os Projetos ARME (Amazon Region Micrometeorology Experiment) e ABLE2 (Amazon Boundary Layer Experiment) (Shuttleworth *et al.*, 1984; Harris *et al.*, 1990). Esses estudos focaram na troca de calor, vapor d'água, CO<sub>2</sub>, e outros gases entre a floresta primária e a atmosfera (Fitzjarrald *et al.*, 1990; Fitzjarrald e Moore, 1990; Wofsy *et al.*, 1990). Determinar as consequências de desmatamento tem sido o foco de diversos estudos de modelos (Nobre *et al.*, 1991; Lean e Rowntree, 1993; Dolman *et al.*, 1999). Estudos especificamente para determinar o impacto do desmatamento no clima e troca de carbono na Amazônia incluem o projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study; Shuttleworth *et al.*, 1991; Fisch, 1996; Gash *et al.*, 1996) e campos experimentais do Programa LBA (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Program In Amazonia), cujo presente trabalho se insere.

Desta forma, o objetivo primário desse trabalho foi analisar o balanço de energia em termos das suas partições, ou seja, os fluxos turbulentos de calor sensível ( $H$ ) e calor latente ( $LE$ ), o fluxo de calor no solo ( $G$ ) e do armazenamento de energia na biomassa ( $S$ ), utilizando os dados das torres de fluxos dos sítios experimentais do Programa LBA em Santarém-PA, sobre diferentes condições de superfície. Os objetivos específicos foram: i) determinar o comportamento das componentes do Saldo de Radiação líquida ( $Q^*$ ); ii) e das componentes da equação do balanço de energia e iii) verificar a contribuição da componente de armazenamento de energia na biomassa e no ar ( $S$ ) para os diferentes sítios.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

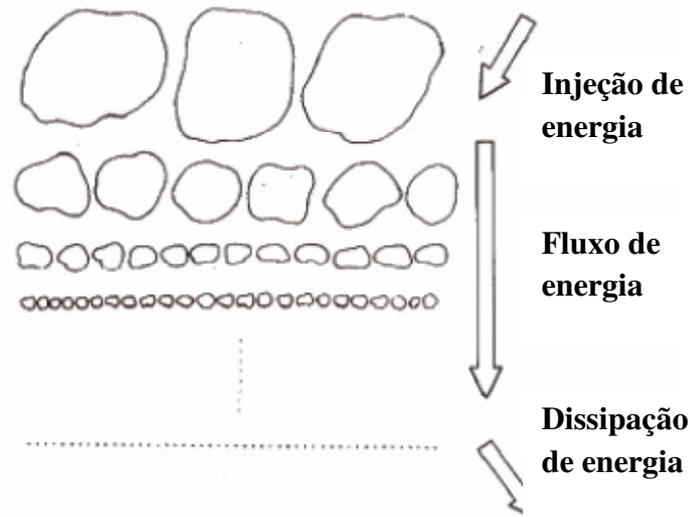
### **2.1 Estimativas dos fluxos turbulentos de energia**

Os forçantes que geram a turbulência na Camada Limite Atmosférica (CLA) originam-se na própria superfície. Dentre eles destaca-se a Turbulência Térmica e está associada com efeitos de fluatibilidade ou empuxo do ar gerada pelo aquecimento solar durante o período diurno. Outro forçante que também gera turbulência chama-se Turbulência Mecânica ou Forçada originada através do cisalhamento do vento causada pela fricção do ar, assim como escoamento de ar sobre obstáculos. Tal efeito se distribui em toda a extensão da CLA, embora tenha maior importância na superfície (Oliveira, 2001).

O conhecimento detalhado de escoamentos turbulentos é de interesse tanto da mecânica de fluidos quanto da física teórica, pois a maioria dos escoamentos encontrados na natureza é turbulenta. Mas, ainda hoje, definir turbulência é difícil. Pode-se visualizá-la como uma superposição de vórtices com diferentes escalas espaciais e temporais, transferindo energia de um vórtice para outro de forma irregular (Stull, 1988).

Essas transferências são responsáveis pelas trocas de momentum, calor e umidade entre superfície-atmosfera e são afetadas por várias escalas dos processos atmosféricos, que controlam, principalmente, as transformações e mudanças de energia nos processos dinâmicos, de interação térmica, evaporação e também, de transportes de poluentes (Foken, 2008).

Segundo Foken (2008) os vórtices turbulentos podem ser pensados como parcelas de ar com grandes características termodinâmicas. Os vórtices turbulentos recebem energia do movimento de médio escala e fornecem a energia por um processo em cascata para vórtices menores os quais dissipam Energia Cinética Turbulenta (ECT) na forma de calor até se dissipar. A distribuição característica dos vórtices turbulentos acontece de acordo com seu tamanho é representada pelo espectro de turbulência: O espectro de turbulência é um campo da distribuição de ECT dos Vórtices turbulentos de acordo com seu comprimento de onda ou frequência que podem classificar a distribuição como macro, meso ou micro turbulência.



**Figura 1** - Processo de cascata de elementos turbulentos (adaptado de Fisch, 1995) note que a diminuição dos tamanhos dos elementos é contínua.

As transferências de energia dos vórtices turbulentos são responsáveis pelas trocas de calor, umidade e  $\text{CO}_2$  entre a superfície e a atmosfera chamadas de fluxos turbulentos. O cálculo desses fluxos de calor ( $H$  e  $LE$ ) pode ser obtido usando os gradientes verticais de temperatura  $T$  e umidade específica  $q$ , respectivamente e pelo coeficiente de difusão turbulenta. O fluxo de  $H$  descreve o transporte turbulento de calor na atmosfera. É a porção de calor total associado com a mudança de temperatura (Stull, 2000), ou seja, varia com o resultado da diferença de temperatura entre a superfície e o ar acima dela. O fluxo de  $LE$  descreve o transporte vertical de vapor d'água e o calor exigido para evaporação gasta na atmosfera. Esses fluxos são importantes na determinação do ciclo hidrológico, desenvolvimento da camada limite, tempo e clima, uma vez que um padrão regional de precipitação dentro da Amazônia está relacionado aos padrões de grande escala de evaporação. A equação desses fluxos de calor ( $H$  e  $LE$ ) se desenvolve a partir da equação 1.

$$F_x = \overline{w\rho_x} \quad (1)$$

Esta equação representa um fluxo de uma grandeza escalar  $x$  qualquer, onde  $w$  é a velocidade vertical do vento,  $\rho_x$  é a concentração do escalar  $x$  qualquer, e a barra horizontal sobreposta ao produto destas variáveis representam a média temporal em um determinado intervalo de tempo. O método de CVT é um princípio de determinação direta dos fluxos, que calcula a correlação entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com desvios temporais da velocidade do vento horizontal (fluxo de momentum), ou das propriedades transferidas na natureza com a temperatura do ar (fluxo de  $H$ ), da umidade do ar

(fluxo de  $LE$ ) e da concentração de  $CO_2$  (fotossíntese e respiração). Entretanto, devido a bastantes flutuações observadas nas medidas de velocidade do vento, temperatura e concentração, usualmente são expressas como a soma de uma componente média e outra flutuante (Baldocchi et al., 1988).

Esse processo é conhecido como decomposição de Reynolds. Segundo Silva (2000) Reynolds deixou uma importante contribuição no estudo da turbulência, pois propôs representar os valores de todas as quantidades dinâmicas do fluxo turbulento como uma soma das componentes médias e turbulentas.

$$X = \bar{X} + X' \quad \text{ou} \quad x = \bar{x} + x'$$

Estas quantidades obedecem algumas propriedades de média, que são as Regras de Reynolds, a saber:

- 1) A média das médias é igual a média:  $\overline{\bar{X}} = \bar{X}$  ;
- 2) A média das flutuações é zero:  $\overline{X'} = 0$  ;
- 3) A média da soma é igual a soma das médias:  $\overline{X + Y} = \bar{X} + \bar{Y}$  ;
- 4) A média da multiplicação é igual a Multiplicação das médias:  $\overline{X \cdot Y} = \bar{X} \cdot \bar{Y}$  ;

$$5) \text{ A derivada: } \overline{\frac{\partial X}{\partial \xi}} = \frac{\partial \bar{X}}{\partial \xi} ;$$

$$6) \text{ A integral: } \overline{\int X d\xi} = \int \bar{X} d\xi .$$

Aplicando esse procedimento às variáveis  $w$  e  $\rho_c$  obtém-se:

$$w = \bar{w} + w' \tag{2}$$

$$\rho_x = \bar{\rho}_x + \rho'_x \tag{3}$$

Onde  $\bar{w}$  é o valor médio da velocidade vertical do vento,  $\bar{\rho}_x$  é o valor médio da concentração de escalar  $x$ , e  $w'$  e  $\rho'_x$  representam as flutuações em relação à média das suas respectivas componentes. Retomando a equação 1 e substituindo as equações 2 e 3, tem-se:

$$F_x = \overline{(\bar{w} + w')(\bar{\rho}_x + \rho'_x)} \tag{4}$$

Desenvolvendo a equação 4, obtém-se:

$$F_x = \overline{\bar{w}\bar{\rho}_x} + \overline{\bar{w}\rho'_x} + \overline{w'\bar{\rho}_x} + \overline{w'\rho'_x} \tag{5}$$

Pela Lei de conservação de massa a média da velocidade vertical do vento  $\bar{w}$  é nula, e os termos que têm apenas um componente flutuante, por definição, também têm a média de

todas as suas flutuações nulas, o fluxo turbulento de uma grandeza escalar  $c$  pode ser escrita como:

$$F_x = \overline{w' \rho'_x} \quad (6)$$

Onde  $w'$  representa a variação da componente vertical da velocidade do vento em relação à sua média, o termo  $\rho'_x$  representa a variação da concentração de um escalar  $x$  qualquer em relação à sua média.

$$H = \rho C_p \overline{w' T'} \quad (7)$$

$$LE = \rho \lambda \overline{w' q'} \quad (8)$$

A técnica de CVT é usada extensivamente para estudar transferência turbulenta acima da cobertura das árvores (Sakai et al., 2001). O uso desta técnica é satisfatório para se obter resultados de flutuação em dias ou condições estáveis fracas, entretanto, nos últimos anos, tem se discutido as incertezas e os possíveis erros nas medidas de fluxos usando esta técnica. Ela se mostra falha em estimar os fluxos com precisão quando a turbulência for intermitente (Pattey et al., 2002 *apud* Acevedo et al., 2004). No caso de superfície relativamente homogênea como pastagem, nas noites calmas, esse problema ocorre devido a uma inversão de temperatura que se desenvolve próximo à superfície fazendo com que a mistura desapareça em poucos instantes (Acevedo et al., 2004).

Com isso, para o caso de mistura fraca, vários critérios de filtragem dos dados foram sugeridos para aplicação acima de superfícies rugosas, como florestas. Uma delas é a correção  $u^*$  (Goulden et al., 1996), onde se substitui dados das noites calmas por noites mais turbulentas para uma situação onde as temperaturas do solo sejam semelhantes. Entretanto, esta técnica era desenvolvida para medidas de transferência em superfícies rugosas, como florestas. Esta correção frequentemente costuma superar esta dificuldade, mas em superfície desmatada, mostra-se falha.

No LBA (Programa de Grande escala da Biosfera Atmosfera na Amazônia), medidas de fluxo estão sendo feitas em florestas e no sítio de pastagem. Em local de floresta, (Goulden et al., 2002), informaram que 70% das observações noturnas ficaram abaixo de  $u^* < 0,2 \text{ms}^{-1}$  critério durante a estação úmida, e 77% durante a estação seca. Além disso, (Miller et al., 2003) verificaram que dependendo do filtro  $u^*$  utilizado, uma floresta pode variar de sumidouro para fonte de carbono líquido.

Os problemas mais severos em estimar saldo de carbono (NEE) acontecem em locais com menor vegetação onde existe uma preponderância das noites tranquilas. Para campo desmatado, como pastagem, segundo (Sakai et al., 2004) essa percentagem foi maior, cerca de

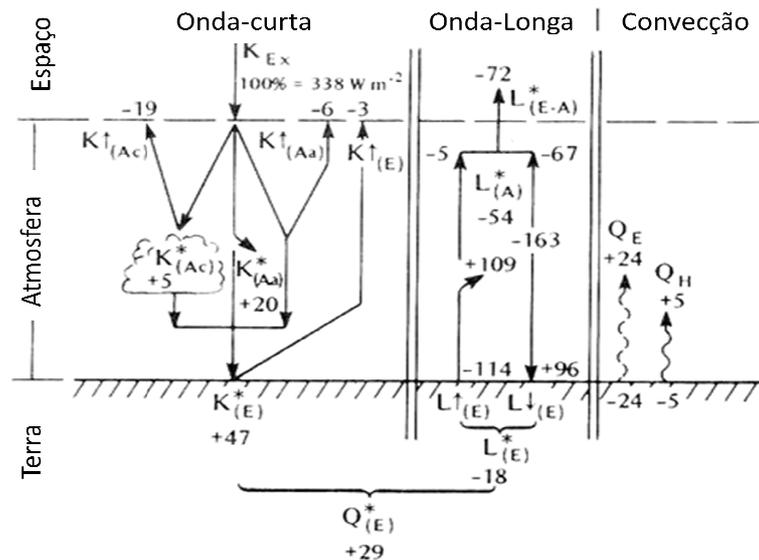
98% do tempo a velocidade de fricção é menor de  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ , e 82% é menor que  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ . Neste caso o desmatamento realça a perda de radiação na superfície formando uma camada termicamente estratificada muito estável. Dessa forma, reduz as trocas noturnas de tal forma que a técnica de Covariância de Vórtices normalmente usada se torna incapaz de fornecer boas estimativas das taxas de respiração da superfície.

Vickers e Mahrt (2003, 2006) desenvolveram um método baseado na decomposição de Multiresolução do fluxo de calor para identificar o tamanho ideal desta janela de maneira a minimizar a influência dos movimentos de mesoescala em situações estáveis. Uma vez que a resposta destas variáveis aos eventos de mesoescala é diferente (Mahrt et al., 2001). Para Campos (2008) a decomposição de um sinal em wavelet significa efetuar médias temporais com escalas de tempo de comprimento variável ao longo das séries dos fluxos de superfície.

Contudo, o método de CVT transformou-se na técnica padrão de medidas de fluxo em nível de dossel das plantas e vem sendo aplicado desde 1996 e utilizado em quinze diferentes localidades na Europa, através da rede EUROFLUX<sup>[1]</sup>, assim como em diferentes sítios experimentais distribuídos no mundo através da rede FLUXNET<sup>[2]</sup>. Sendo reconhecido como a forma mais confiável e direta para monitorar os comportamentos desses fluxos a curto, médio ou longo prazo em diferentes ecossistemas (Malhi et al, 1998).

## **2.2 Balanço Radiativo**

A energia disponível no sistema terra-atmosfera é, quase na sua totalidade, originada da energia radiante emitida pelo Sol (figura 2). Essa radiação incidente no topo da atmosfera pode ser absorvida por constituinte atmosféricos, refletidas por estes de volta ao espaço, refletida novamente pela atmosfera em direção à terra, ou recebida diretamente na superfície.



**Figura 2** - Diagrama esquemático da distribuição anual média da energia solar no sistema Terra-Atmosfera, onde os valores são expressos como percentagens da média anual de radiação incidente no topo da atmosfera  $\overline{K_i}$ . Adaptado de Oke (1987).

A propriedade de refletir ondas curtas é denominada de albedo, ou seja, é a razão entre a radiação refletida e a radiação global incidente ou poder refletor da superfície (equação 9),

$$alb = \frac{K \uparrow}{K \downarrow} \cdot 100 \quad (9)$$

Onde: *alb* é o albedo (%);  $K \downarrow$ , a radiação incidente; e  $K \uparrow$ , a radiação refletida. O valor médio de energia que chega ao topo da atmosfera ao longo de um ano  $\overline{K_i}$  é de  $342 \text{ W m}^{-2}$  (Rotty & Mitchell, 1974). A figura 3 mostra a contribuição média de cada um dos processos citados acima em valores percentuais de  $\overline{K_i}$ . O Balanço radiativo médio de onda curta é o seguinte:

$\overline{S_i}$	$S \uparrow_{nuvens}$	$S \uparrow_{atm}$	$S^*_{nuvens}$	$S^*_{atm}$	$S \uparrow_{Terra}$	$S^*_{Terra}$
100	19	6	5	20	3	47

**Figura 3** - Valores médios dos componentes do balanço de radiação de onda curta (adaptado de Acevedo, 2003).

Do total incidente do topo da atmosfera, 19% são refletidos diretamente de volta ao espaço por nuvens e 6% são refletidos pelos demais constituintes atmosféricos. Estes, por sua vez, são melhores absorvedores de onda curta (20%) que as nuvens (5%). Do total que chega à superfície da Terra, 3% são diretamente refletidos e 47% absorvidos.

A emissão de energia pela superfície terrestre pode ser calculada através da Lei de Stefan-Boltzmann:

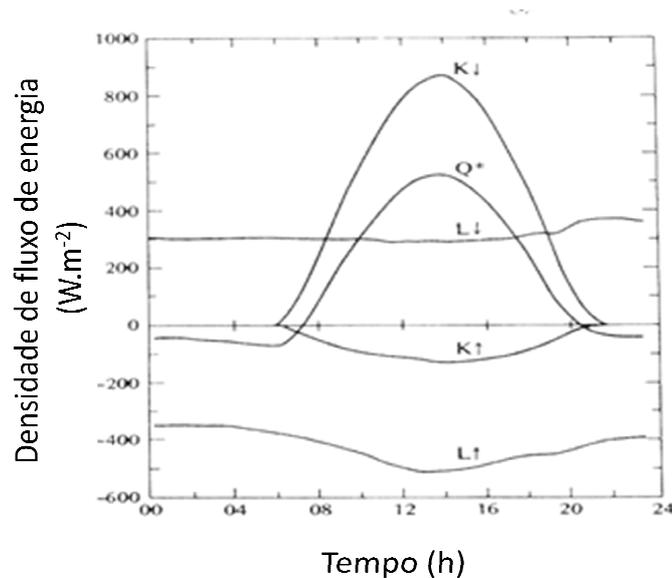
$$E = \varepsilon \sigma T_0^4 \quad (10)$$

Onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, e vale  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ , e  $\varepsilon$  é a emissividade do corpo e tem valor próximo à unidade. Do ponto de vista observacional, o balanço mais importante é o superficial, pois é na superfície que o ser humano vive e faz as suas medidas. As componentes desse balanço são:  $K\downarrow$  (radiação incidente de onda curta),  $K\uparrow$  (radiação de onda curta refletida pela superfície),  $L\downarrow$  (radiação de onda longa emitida pela atmosfera para a superfície),  $L\uparrow$  (radiação emitida pela superfície em onda longa).

A soma desses quatro componentes determina a radiação líquida ( $Q^*$ ) e o balanço radiativo superficial, como mostra a equação 11. A evolução típica da radiação líquida é positiva durante o dia, quando é dominada por  $K\downarrow$ , e negativa durante a noite, quando só existem as componentes de onda longa.

$$Q^* = (K\downarrow - K\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow) \quad (11)$$

Dependendo do tipo de superfície, apenas as partes que partem da superfície ( $K\uparrow$  e  $L\uparrow$ ) têm seus valores alterados (figura 4). Entretanto, elas tendem a se compensar, de forma que não há variação significativa do saldo de radiação para locais diferentes, ou seja, superfícies nas quais o albedo é maior (maior  $K\uparrow$ ) absorvem menos energia em onda curta, se aquecendo menos e emitindo menos  $L\uparrow$ , forma a reduzir a variabilidade de  $Q^*$ .



**Figura 4** - Componentes do balanço radiativo em 30 de julho de 1971, em Matador, Saskatchewan ( $50^\circ \text{ N}$ ), Canadá (adaptado de Oke, 1987)

A distribuição de radiação solar é quem determina a maioria dos fenômenos no sistema terra-atmosfera e tem grande importância na determinação das taxas de fotossíntese e evapotranspiração. O saldo de radiação, resultante do balanço de radiação de ondas longas e curtas, impulsiona alguns processos físicos e é utilizado para aquecer a superfície e o ar acima dela ou para fornecer energia para evaporar a água do solo e da vegetação (Bastable et al, 1993).

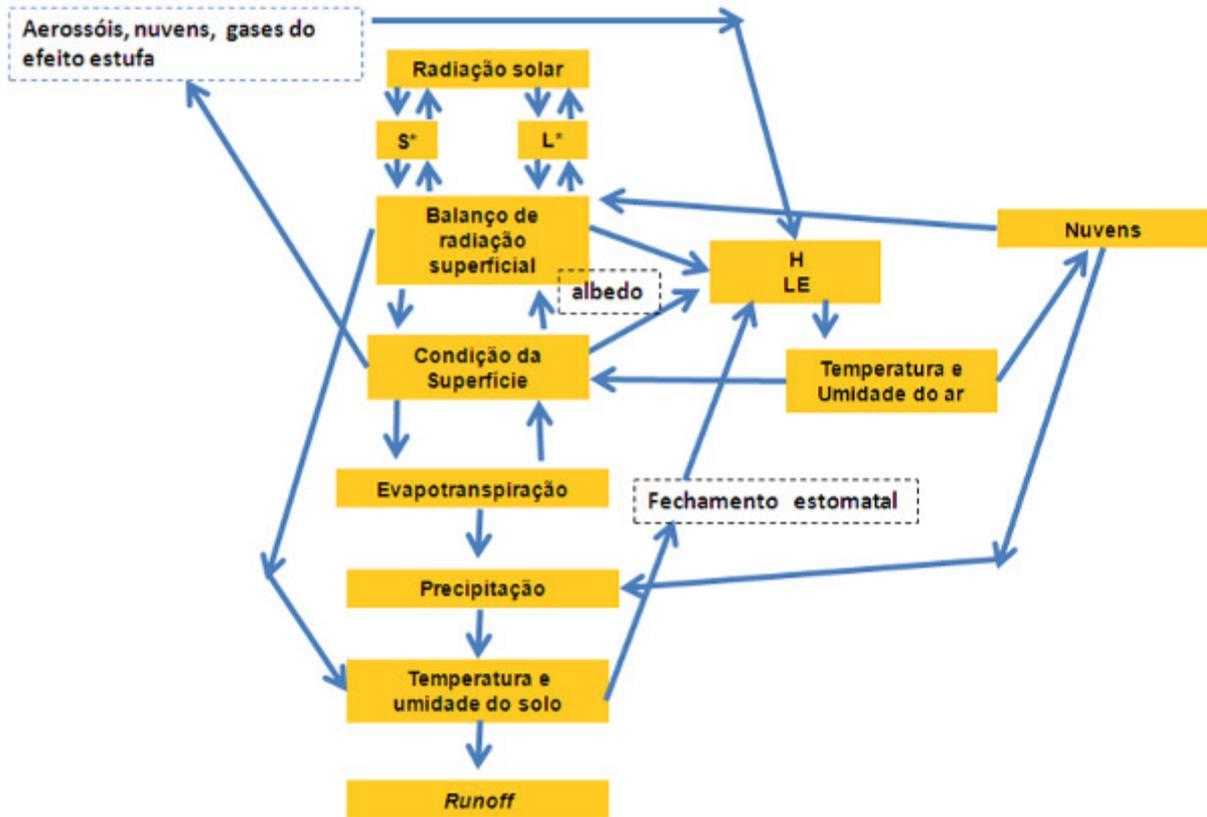
O balanço de energia na superfície está estreitamente relacionado ao ciclo hidrológico, uma vez que a evaporação da superfície é uma componente chave nos balanços hídricos e de energia (Hartmann, 1994). O entendimento do balanço de energia na superfície terrestre é necessário para a compreensão dos processos climáticos, nas diversas escalas espaciais e temporais, e de suas influências externas.

Segundo (Silva, 2003) o balanço de energia das superfícies vegetadas permite dimensionar as trocas de massa e energia no solo-planta-atmosfera, por meio do estudo da partição do saldo de radiação nos diversos processos que ocorrem na cultura. O método permite avaliar as alterações no microclima da vegetação em função dos estágios de desenvolvimento da cultura e em função das condições do solo e da atmosfera

### **2.3 Balanço de energia na superfície**

A superfície e a atmosfera na Amazônia formam um sistema altamente acoplado. Na superfície, evapotranspiração, troca de carbono e queima da biomassa e interagem na atmosfera com aerossóis, núcleos de condensação, nuvens e precipitação. Na composição atmosférica, nuvens e aerossóis determinam a propagação de radiação direta e difusa, alterando alguns processos no sistema superfície-atmosfera (figura 5).

A radiação solar é a fonte primária de energia e fator determinantes nos processos físicos, biofísicos e biológicos e está associada com os processos de absorção de radiação de ondas curtas e longas ( $S^*$  e  $L^*$ ) os quais compõem o balanço de radiação superficial. Alteração nesses componentes geraria mudanças nos fluxos de energia ( $H$  e  $LE$ ) modificando a temperatura e umidade do ar, e conseqüentemente os processos de formação de nuvens o que provocaria novas mudanças no balanço de radiação superficial, o qual poderia ser alterado pelas mudanças no albedo devido a mudança do uso da terra. E, dependendo da alteração superficial, como redução da cobertura vegetal, ocasionaria numa redução da evapotranspiração, alterando os regimes de precipitação pluviométrica e, posteriormente ocasionaria mudanças na temperatura e na quantidade de umidade do solo. Tal situação poderia criar condições desfavoráveis a determinados tipos de vegetações ou microrganismos.



**Figura 5** - Esquema de processos de interação entre a superfície-atmosfera. Adaptado de BETTS et al (2010).

Nesta breve revisão não se pôde cobrir todos os aspectos da figura 5. Mas sustenta no entendimento da principal pergunta experimental deste trabalho, a qual consiste em entender a influencia da mudança da condição da superfície nos componentes do balanço de radiação e na partição de energia superficial.

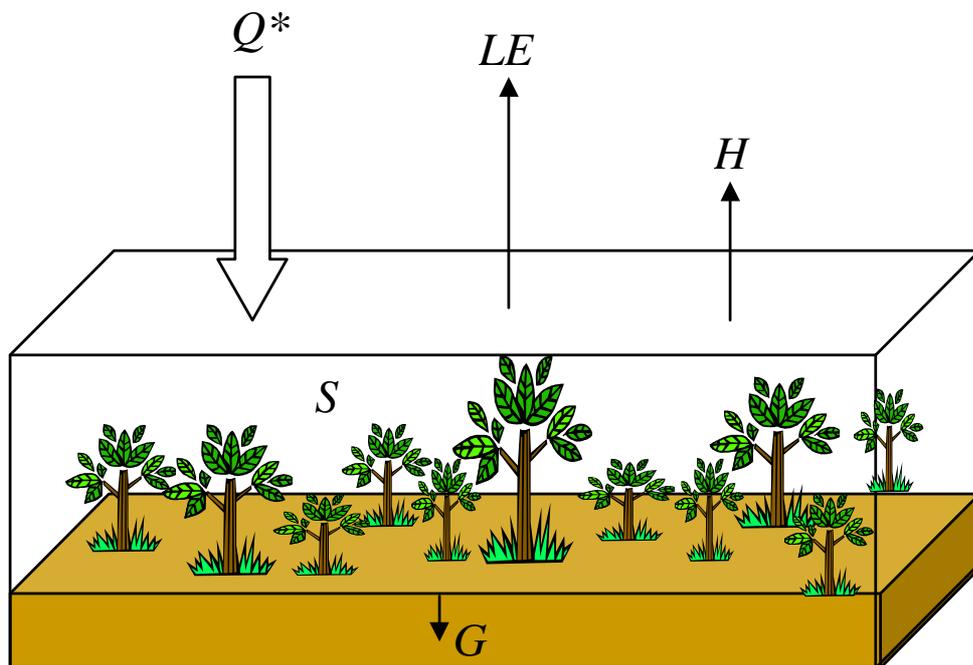
O balanço de energia é fundamentado no princípio físico da conservação da energia e se relaciona com os fluxos de energia disponível na superfície ( $Q^*$ ) com a energia utilizada, principalmente para o fluxo de calor latente ( $LE$ ) na evaporação e o fluxo de calor sensível ( $H$ ) nas variações de temperatura do ar e do solo ( $G$ ) e na energia armazenada na biomassa e no ar,  $S$ , (Galvão & Fisch, 2000; Moore & Fisch, 1986) (equação 12). Em certos momentos, o fluxo de calor sensível pode passar de consumidor para fornecedor de energia para o processo evapotranspirativo (Silva, 2003). O balanço de energia varia de diversas maneiras dependendo do tipo de superfície.

$$Q^* = H + LE + G + S \quad (12)$$

Dependendo da região em estudo, outros termos podem ser acrescentados, como o efeito da advecção,  $ADV$ , (Gielow et al, 2000) e energia utilizada no processo fotossintético,  $\mu C$ , (Leitão, 1989); ou substituídos, como é o caso do fluxo de calor no solo que substitui o

armazenamento de calor na lâmina de água em condições de cheias (Burba *et al*, 1999).

O balanço de energia, em geral, é avaliado desprezando-se os termos de  $S$  e  $ADV, \mu C$ , cuja soma é, em geral, inferior a 5 % de  $Q^*$ , pode-se avaliar o fechamento do balanço de energia por meio da dispersão entre as medidas dos fluxos turbulentos ( $H + LE$ ). Entretanto, segundo Michiles e Gielow (2008) a inclusão de  $S$  na análise do balanço de energia é um componente importante para floresta Amazônica, devido à sua expressiva biomassa, que combinada com alta variabilidade da temperatura e umidade do ar, altos índices pluviométricos.



**Figura 6** - Componentes de energia. Fonte: adaptado de Augusto Michiles.

Encontrar um bom fechamento do balanço de energia proporciona confiabilidade nos dados medidos e indica que todos os sistemas se encontram com desempenho satisfatório. Isso possibilita avaliar a qualidade dos dados de fluxo de energia obtidos pelo método de covariância de vórtices turbulentos, pois como as medidas do  $Q^*$ ,  $LE$ ,  $G$ ,  $S$ ,  $H$  são realizadas por métodos diferentes, o fechamento do balanço indica que está havendo concordância entre as medidas.

A Taxa de Armazenamento de Energia Térmica (TAE) tem sido um componente significativo para o balanço superficial de energia principalmente para períodos curtos em florestas altas. Moore e Fisch (1986) desenvolveram uma expressão empírica para se estimar os termos da TAE para uma floresta similar a da Reserva Ducke (Manaus, AM) usando

mudanças horárias da temperatura e umidade específica do ar, medida acima da copa a uma altura de 41 m. Michiles e Gielow (2008) também desenvolveram expressões empíricas (ver equações 13c, 14b e 15b) para se estimar os termos da TAE, cujas medidas foram feitas na Reserva Biológicas do Cuieiras, mais conhecida como ZF2, na Amazônia Central, 50 km à noroeste de Manaus, Brasil

A TAE no ar é composta por dois componentes, um relacionado com as mudanças de temperatura no ar ( $\Delta T$ ) e outro relacionado com as variações de umidade específica ( $\Delta q$ ) (equação 13a).

$$S_{ar} = \rho_a (C_p \Delta \bar{T} + \lambda \Delta \bar{q}) \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (13a)$$

No qual  $\Delta \bar{T}$  e  $\Delta \bar{q}$  são, respectivamente, a variação da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade específica ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), medidas a 51,1 m. Usando valores  $\rho_a = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $C_p = 1004 \text{ j.kg}^{-1}.\text{^{\circ}C}^{-1}$ ,  $\lambda = 2,4 \times 10^6 \text{ j.kg}^{-1}$ ,  $\Delta z = 53 \text{ m}$  e  $\Delta t = 3600 \text{ s}$ , obteve-se a equação 13b. Entretanto, antes da realização do cálculo de  $\Delta q$ , foi necessária a transformação dos valores de umidade relativa para umidade específica do ar. Para tanto, utilizou-se a seguinte expressão (equação 13b), adaptada de Reichardt (1996):

$$q_i = \frac{u_{ri}}{(273,15 + T_i)} \exp \left[ \frac{17,269 T_i}{(237,3 + T_i)} \right] \cdot 1,0992 \times 10^{-2} \quad (13b)$$

Em que  $u_{ri}$  e  $T_i$  são, respectivamente, a umidade relativa e a temperatura do ar obtida em cada camada  $i$ .

$$S_{ar} = 17,7 \Delta \bar{T} + 43,1 \Delta \bar{q} \quad (13c)$$

A TAE horária nos troncos pode ser obtida através da expressão simplificada a seguir:

$$S_{tr} = m_{tr} c_{tr} \alpha \frac{\Delta \bar{T}(t + \tau)}{\Delta t} \quad (14a)$$

Onde  $\alpha$  e  $\tau$  representam a atenuação da onda da temperatura do ar, e a diferença da fase da onda da temperatura do ar e do tronco, respectivamente. Então, com os valores de biomassa dos troncos por unidade de área ( $m_{tr}$ ) e a média do calor específico dos troncos ( $C_{tr}$ ), Michiles e Gielow (2008) ajustaram a equação 14a e descobriram que para se obter melhor resultado eles tiveram que avançar 1h a temperatura do ar ( $\tau = 1 \text{ h}$ ). Com 20 dias

selecionados do experimento feito por esses autores e  $\alpha$  igual a 0,49, ajustou-se até o slope desta equação se transformar em 1, então (equação 14b):

$$S_{tr} = 14,3\Delta\bar{T} (t + 1) \quad (14b)$$

Para calcular a TAE para o restante da biomassa usou-se:

$$Sum = [m_g c_g + (m_r + m_{tr})c_r + (m_f + m_{oc})c_f] \beta \frac{\Delta\bar{T}}{\Delta t} \quad (15a)$$

Na qual  $\beta$  representa o mesmo que  $\alpha$ , mas referente ao restante da biomassa, como galhos, ramos, liteira, folhas e outros componentes). O melhor ajuste (slope = 1,  $R^2 = 0.72$ ) para  $\beta$  foi de 0,76 usando os 20 dias selecionado, com valores da biomassa da Reserva Biológica de Cuieiras, Manaus, AM, Brasil, a equação 15a ficou (equação 15b).

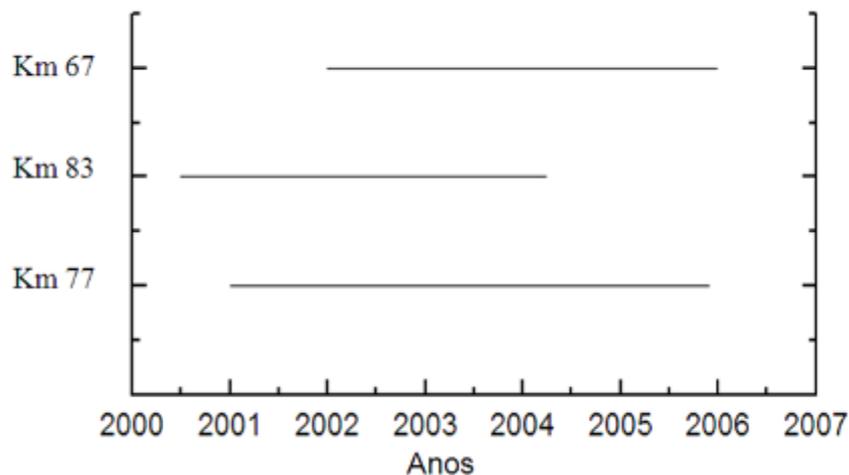
$$Sum = 14,9\Delta\bar{T} \quad (15b)$$

Portanto, segundo Michiles e Gielow (2008) é possível representar a TAE com expressões simplificadas e eficientes para  $Sar$ ,  $Str$  e  $Sum$ , dependendo apenas de medidas de temperatura e umidade do ar acima da copa.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Locais de estudos e conjuntos de dados

O conjunto de dados utilizados pertence ao Programa LBA (Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia), cujo período utilizado compreendeu entre meados do ano 2000 e início de 2006. O conjunto de dados compreende medidas horárias de diversas variáveis, dentre as quais se utilizou: componentes do saldo de radiação, as componentes do Balanço de energia ( $H$ ,  $LE$  e  $G$ ); Temperatura e umidade relativa do ar para o cálculo da taxa de armazenamento na biomassa e no ar ( $S$ ), precipitação pluviométrica e umidade do solo para os três sítios.



**Figura 7** - Período do conjunto de dados para os três sítios. Integrados ao projeto CD-32 do LBA.

Esses dados foram medidos pelas sensores das torres micrometeorológicas instaladas e instrumentadas: uma instalada num campo agrícola; outra em área de floresta de manejo madeireiro e a última numa área de floresta primária situada nas dependências da Floresta Nacional do Tapajós (FNT), esta foi criada pelo decreto nº 73.684 de 19/02/74, sendo a 13ª Floresta Nacional criada no país e a segunda criada na região Norte e no Estado do Pará e abrange uma área de 6000 km<sup>2</sup> com sede administrativa na cidade de Santarém. Limita-se a oeste com o rio Tapajós, a leste com a BR-163 (rodovia Santarém-Cuiabá), ao sul com o rio Cupari.

A vegetação enquadra-se na área de bioma Amazônico, ou seja, floresta equatorial, região fitoecológica da floresta ombrófila densa e estágio sucessional clímax (Brasil, 1992). O relevo é denominado como flanco, que é constituído de terrenos acidentados e superfícies planas em direção ao rio Tapajós. Segundo Fupef (1984), a unidade de relevo presente na área de interesse apresenta-se com extensas superfícies de forma tabular, conhecidas e denominadas na região como platôs. O solo da região caracteriza-se pedologicamente, pela ocorrência de solos com predominâncias de latossolos amarelos distróficos recobertos por uma floresta densa.

As áreas de campo agrícola, floresta manejada e floresta primária estão localizadas na municipalidade de Belterra-PA, ao longo da BR-163 (figura 8). A torre micrometeorológica situada no campo agrícola (Fazenda Paraíso) (3.0121 °S, 54.5371 °W) está localizado à aproximadamente 77 km da cidade de Santarém-PA, cujo objetivo primário foi verificar a influência dos diferentes tipos de condição de superfície na interação biosfera-atmosfera. A condição da superfície do terreno variou periodicamente de acordo com a Tabela 1.



Figura 8 - Localização dos sítios de pesquisa (cortesia: Rodrigo da Silva)

Tabela 1 – Condições de superfície entre os anos de 2000 a 2005

Condição de Superfície	Mês inicial	Ano inicial	Dia final	Ano final
Pastagem	Setembro	2000	Novembro	2001
Arado	Novembro	2001	Fevereiro	2002
Arroz	Fevereiro	2002	Junho	2002
Descanso	Junho	2002	Dezembro	2002
Arado	Dezembro	2002	Janeiro	2003
Arroz	Janeiro	2003	Maio	2003
Arado	Maio	2003	Maio	2003
Soja	Maio	2003	Setembro	2003
Descanso	Setembro	2003	Janeiro	2004
Arado	Janeiro	2004	Janeiro	2004
Arroz	Janeiro	2004	Abril	2004
Arado	Abril	2004	Maio	2004
Soja	Maio	2004	Setembro	2004
Descanso	Setembro	2004	Março	2005
Arado	Março	2005	Março	2005
Soja	Abril	2005	Agosto	2005
Descanso	Agosto	2005	Dezembro	2005

Na floresta manejada (3.01030°S, 54.58150W), a vegetação é de floresta tropical fechada com copa emergente (comprimento de copa 35-40 m) em área de planalto. A floresta estende-se 5

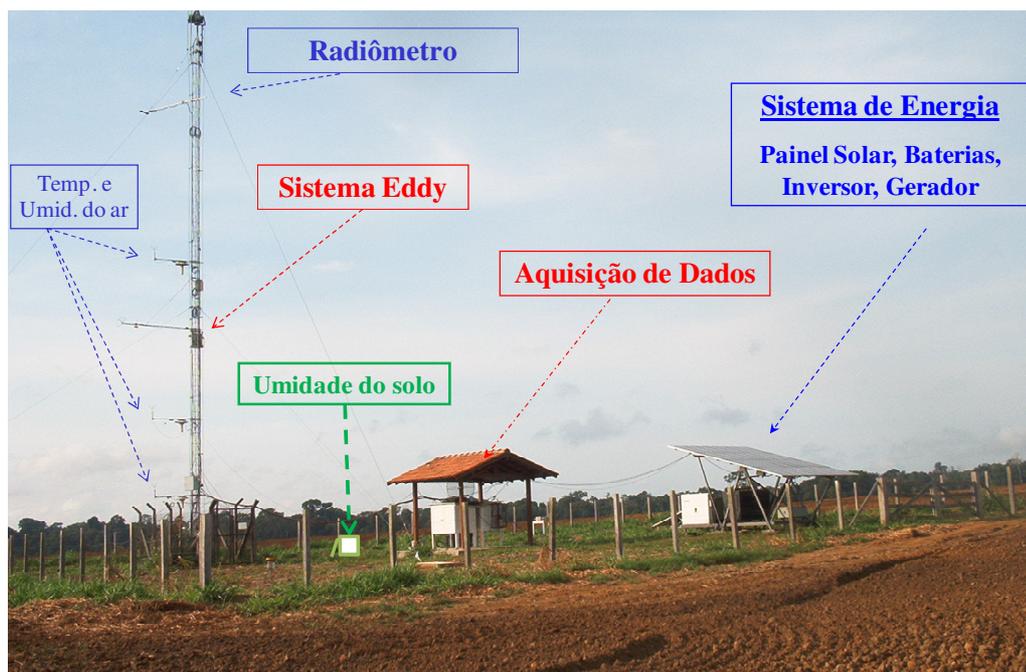
km para o leste, 8 km para o sul, e 40 km para o norte antes de alcançar a pastagem. A floresta continua 8 km para oeste antes de chegar no rio Tapajós. A torre micrometeorológica situada na floresta manejada está localizada a 83 km da cidade de Santarém-PA. O objetivo fundamental foi verificar as possíveis influências do manejo florestal nos processos que regem o funcionamento do ecossistema florestal. Mais detalhes ver Goulden et al. (2004) e Miller et al. (2004)

A torre micrometeorológica ( $02^{\circ}51' S$ ,  $54^{\circ}58' W$ ) situada na Floresta Primária está localizada à aproximadamente 67 km da cidade de Santarém-PA, e foi instrumentada com o objetivo principal de verificar os processos físicos, biofísicos e biológicos entre biosfera-atmosfera (Saleska et al., 2003; Hutyra et al., 2007)

### 3.2 Instrumentação e Aquisição de dados

#### 3.2.1 Campo Agrícola (km 77)

Foi instalada na Fazenda Paraíso uma torre de 20 m de altura para monitorar padrão de variáveis onde foi montado um sistema de Eddy Covariância (figura 8) que constitui um anemômetro sônico tridimensional (SATI/3K Applied Technologies, Inc., Longmont, CO, USA), e um analisador de gás por infravermelho (IRGA, Licor 6262, Licor Inc., Lincoln, NE, USA) para medidas concentração de vapor d'água instalado a 8,75m de altura (Tabela 2) (Sakai et al, 2004).



**Figura 9** - Torre micrometeorológica no Campo agrícola (fazendo Paraíso)

Os sensores de temperatura e umidade estão protegidos da radiação solar direta (Vaisala Humitter CS500; Vaisala Oyj, Vantaa, Finlândia) à a 6,1; 4,1; 2,2 m do solo. Próximo do topo da torre (17,8m), radiação solar global incidente e refletida (Kipp e Zonen, CM11/14, Kipp e Zonen Inc., Delft, Holanda), radiação de onda longa emitida da superfície e da atmosfera (CG2). Esses fluxos radiativos foram coletados a 0,2 Hz. Foi instalado um sensor para medidas de umidade do solo a 0,30 m de profundidade (Campbell, Inc. CS615).

**Tabela 2** – Instrumentação de campo na Fazenda Paraíso (km77)

Componentes	Modelo	Nível vertical (m)	Variável medida*
Anemômetro sônico 3D	SATI/3K		$U_x, U_y, U_z, T_{sonica}$
Analizador de gás por infravermelho	Licor 6262	8,75	$H_2O, CO_2$
Sensor de temperatura e umidade relativa do ar	CS500	6,1; 4,1 e 2,2	$T_{ar}, UR$
Sensor de radiação solar global incidente e refletida	CM11/14	17,8	$K_{\downarrow}, K_{\uparrow}$
Sensor de radiação de onda longa	CG2		
Sensor de umidade do solo	CS615	- 0,30	$\theta$
Pluviômetro			Precipitação
Datalogger	Campbell Sci.,23x		

O anemômetro sônico tridimensional e o IRGA medem dados a 10 e 5 Hz, respectivamente. Sinais analógicos do instrumento de resposta lenta são coletados pelo *datalogger* (coletor de dados) (Campbell Sci., 23x, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) que envia uma série a 0,2 Hz. O software funciona num computador sincronizado com a série, onde processa os dados próximo do tempo real (Sakai et al., 2004).

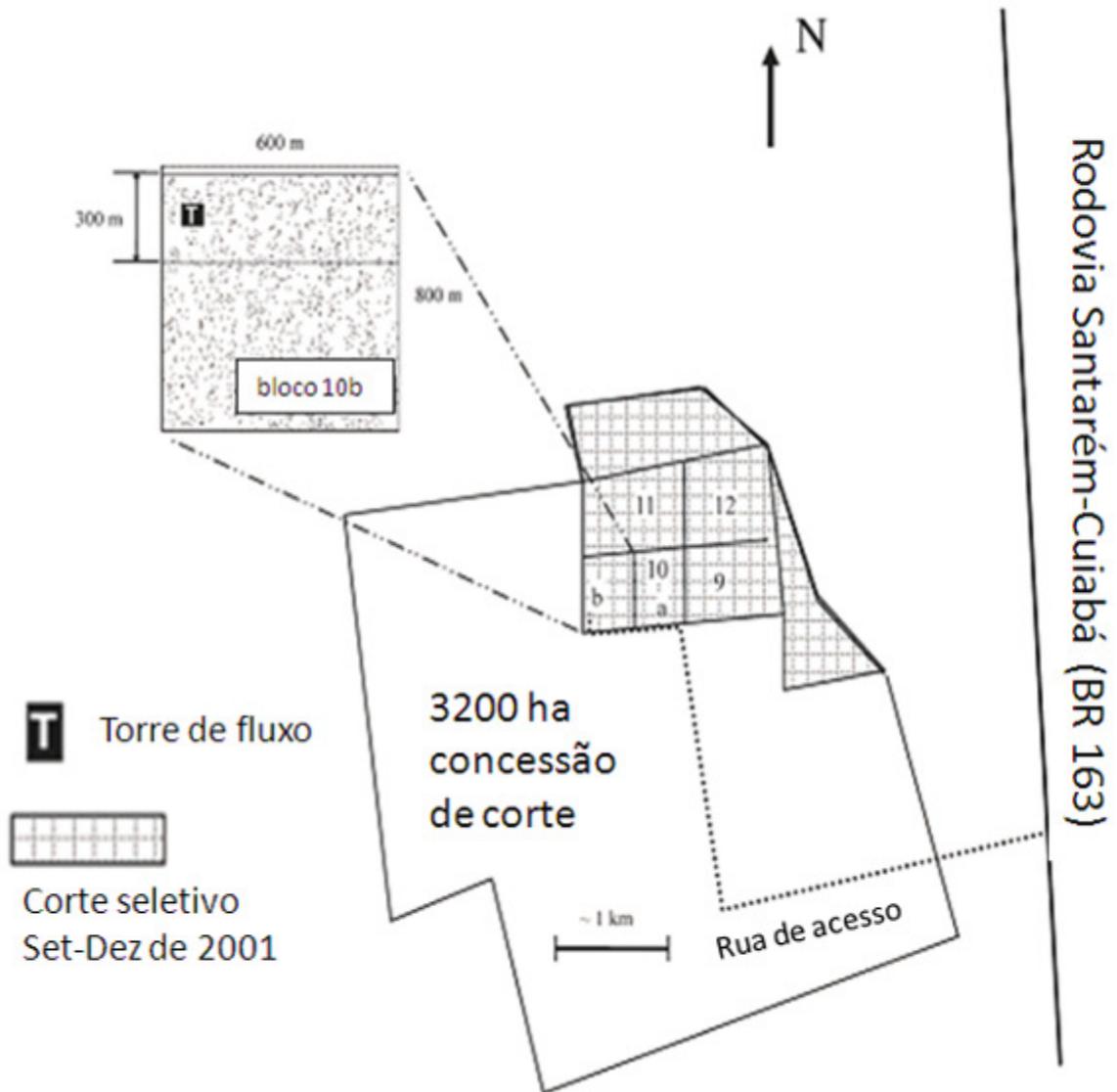
Para observações contínuas de um sítio afastado de qualquer rede de energia elétrica, para minimizar os riscos de danos ambientais, e para minimizar a base de influencia de geração de  $CO_2$ , todo instrumento e aquisição foram alimentados por um sistema de força híbrido, (Sunwise Inc., Kingston, NY, USA). Este sistema consiste em painel fotovoltaico, um banco de baterias, um auxílio de gerador a diesel, e um inversor, que estava designado para prover 500 W de 120 V CA continuamente por todo o dia.

### 3.2.2 Floresta manejada (km83)

O sitio km 83 do LBA ECO (S 3°01'3.0", W 54°58'14.99") está localizada na Floresta Nacional do Tapajós (FNT), a 50 km ao Sul da cidade de Santarém, Pará, Brasil (da Rocha *et al.*, 2004; Goulden *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2004). O acesso para o sitio é através de uma estrada à 83 km ao longo da Rodovia Santarém Cuiabá (BR 163, figura 10). A vegetação é de floresta tropical fechada com copa emergente (comprimento de copa 35-40 m) em terreno de planalto e se estende 5 km para o leste, 8 km para o sul, e 40 km para o norte antes de alcançar a pastagem e continua 8 km para oeste da extremidade do planalto antes de chegar no rio Tapajós 14 km da torre. A plataforma instrumental foi instalada em junho de 2000, aproximadamente 2 km a oeste da entrada do km 83 da Rodovia Cuiabá-Santarém

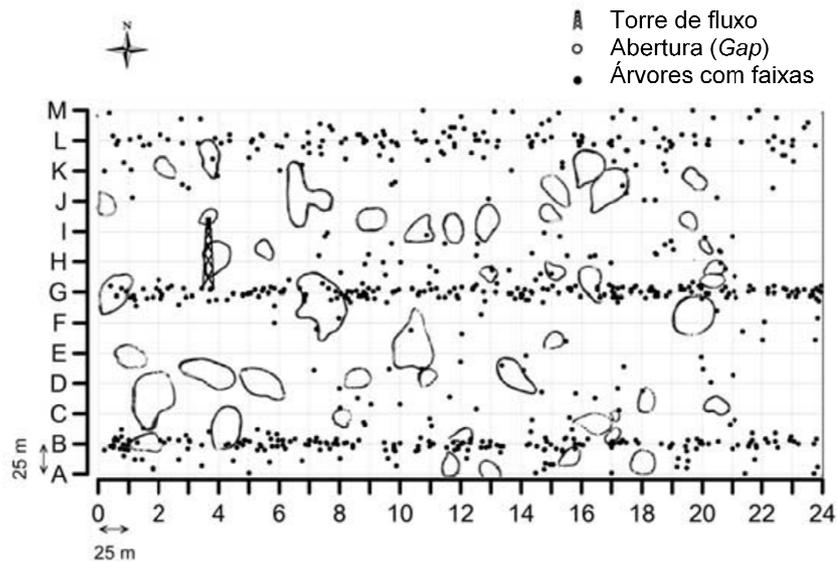
O Corte seletivo foi manejado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e executado por uma companhia comercial (Fazenda Treviso/MAFLOPS). Em 1997, 200 hectares de floresta primária sofreram exploração de baixo impacto, cujo objetivo foi minimizar danos à floresta através de um cuidadoso planejamento das atividades relacionadas com a exploração madeireira (inventário florestal de 100% das árvores com Diâmetro à Altura do Peito (DAP) acima de 35 cm, corte de cipó, escolha prévia das árvores exploradas, planejamento dos ramais e pátios, planejamento da queda das árvores, utilização de trator florestal e planejamento da sua entrada para minimizar danos e compactação do solo).

A intensidade de exploração foi de aproximadamente 20 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> e as estradas e pátios de estocagem contribuíram para uma perda máxima de aproximadamente 5-7% da cobertura de copa em cada parcela. Em novembro de 1999, foi iniciada a exploração de 500 ha de floresta pela iniciativa privada. A intensidade da exploração foi aumentada para 40 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> (cerca de seis árvores por hectare), o que está próximo à intensidade das explorações comerciais praticadas fora da FNT. Em 2003, uma área de 3.200 ha já havia sido totalmente explorada utilizando essa mesma intensidade (Henriques *et al.*, 2008)



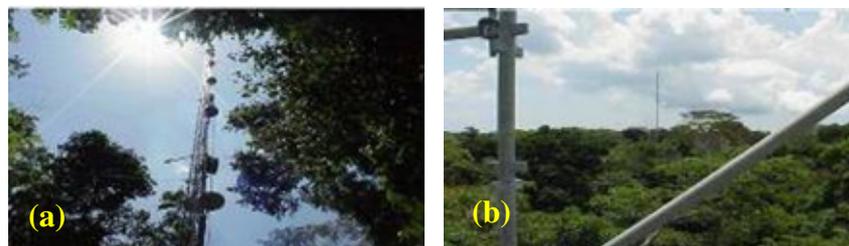
**Figura 10** - O esboço do sitio km 83 na Floresta Nacional do Tapajós (FNT), Pará, Brasil. A área abrange aproximadamente 700 ha da porção de 3200 ha de concessão de corte que foi programada para corte entre setembro a dezembro de 2001. A localização da torre de fluxo está marcada pela letra "T" no bloco 10b.

Adaptado de Figueira et al. (2008)



**Figura 11** - Árvores marcadas com faixas dendrométricas antes do corte em Novembro de 2000 são mostrada como pontos sólidos. Aberturas (gap) criadas pelo corte seletivo em Setembro de 2001 são mostrados como forma irregular. Os *plots* no transecto 25 N-S estão numerado de 0 a 24 e os de 13 L-O por letras “A” a “M”. A Torre de fluxo está indicada no bloco G4.

Na floresta, a instrumentação foi fixada em uma torre de 64 m de altura (figura 12), com o anemômetro sônico Campbell CSAT3 3-D (tabela 3) para medidas de temperatura do ar e velocidade tridimensional do vento, um analisador de gás no infravermelho (IRGA) por caminho aberto LiCor LI7500) para medidas de concentração de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, saldo de radiação (saldo-radiômetro REBS Q-7,1), irradiâncias de onda curta incidente e refletida (piranômetro Kipp & Zonen CM6B) e precipitação (pluviômetro Texas Electronics TE525), e umidade do solo em diferentes níveis de profundidade (Tabela 3) (refletômetros no domínio da frequência (FDR) – Campbell CS615-G).



**Figura 12** – Floresta manejada: a) perfil da torre e b) visão da torre.

A aquisição das medidas foi feita através de um sistema de coletor de dados (“data-loggers” – Campbell Scientific CR10X, CR23X) conectados em rede a um micro-computador central e gerenciado pelo programa PC208W (Campbell Systems – versão 3,1), que

armazenou os dados em arquivos de baixa frequência (valores médios de 30 minutos) e altas frequências (4,0; 1,0; 0,5 ou 0,1 Hz), contendo 24 h de medidas contínuas.

Descrição completa do esboço experimental e instrumentação são fornecidos em Goulden *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2004; Sakai *et al.*, 2004. Os fluxos foram rotacionados para o plano da velocidade vertical média (McMillen, 1988).

**Tabela 3** – Instrumentação de campo na Floresta (km83)

Componentes	Modelo	Nível vertical (m)	Variável medida*
Anemômetro sônico 3D	CSAT3 3-D	64	$U_x, U_y, U_z,$ $T_{sonica}, P$
Analizador de gás por infravermelho	LiCor LI7500	64; 50; 40; 35; 20; 10,7; 6; 3; 1,4; 0,7; 0,35 e 0,1	$H_2O, CO_2$
Sensor de temperatura e umidade relativa do ar	CS500	2	$T_{ar}, UR$
Saldo-radiômetro	REBS Q-7,1	64	$Q^*$
Piranômetro	CM6B		$K_{\downarrow}, K_{\uparrow}$
Sensor de radiação de onda longa	CG2		$L_{\downarrow}, L_{\uparrow}$
Sensor de umidade do solo	CS615-G	0,05; 0,10; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2; 2,25 e 2,5	$\theta$
Pluviômetro	TE525	0,50	Precipitação
Datalogger	CR10X, CR23X		

### 3.2.3 Floresta primária (km 67)

O sitio está localizado na Floresta Nacional do Tapajós (54° 58' W, 2° 51' S, Pará, Brasil), na rodovia Santarém- Cuiabá (figura 13) à 67 km. Como parte do Programa de Grande Escalar da Biosfera-atmosfera na Amazônia (LBA), uma iniciativa internacional conduzida no Brasil, a qual possui instalada uma torre de fluxos turbulentos 1 km ao leste da rodovia. Temperatura, umidade relativa e precipitação pluviométrica é 25 °C, 85%, e 1920 mm por ano, respectivamente (Parotta *et al.*, 1995). Solos são predominantemente pobres em nutrientes (oxisolos) com areia (Silver *et al.*, 2000) ambos tem baixo conteúdo orgânico e capacidade de troca de cátions. A copa é composta por grandes árvores emergentes (a 55m de altura), *Manilkara huberi* (Duke) Chev., *Hymenaea courbaril* L., *Betholletia excelsa* Humb. e *Bonpl.*, e *Tachigalia spp.*, e uma copa fechada a ~ 40m. A floresta pode ser considerada primária (Clark, 1996).



**Figura 13** – Oeste do Pará (Santarém) – km 67, torre do sitio da floresta primária: a) perfil da torre; b) abrigo dos instrumentos de controle climáticos e c) visão da torre.

Calibrações de vapor de água foram feitas utilizando as flutuações diárias da  $TV - Tk$ , onde a  $T_v$  é a temperatura sônica (relacionado com a velocidade do som fornecido pelo anemômetro sônico), temperatura do ambiente. Esta abordagem foi necessária devido a falhas nos hidrômetros originalmente instalados (ver Hutyra et al., 2007).

**Tabela 4** – Instrumentação de campo na Floresta (km67)

Componentes	Modelo	Nível vertical (m)	Variável medida*
Anemômetro sônico 3D	CSAT3	57,79	$U_x, U_y, U_z,$ $T_{sonica}, P$
Analizador de gás por infravermelho	LiCor LI-6262	62,24; 50,05; 39,41; 28,71; 19,57; 10,42; 3,05; 0,91	$H_2O, CO_2$
Sensor de temperatura e umidade relativa do ar	CS500	2	$T_{ar}, UR$
Saldo-radiômetro	RebsQ7,1	64,1	$Q^*$
Velocidade do vento	Spinning cup anemometer, MetOne010C	64,1; 52,3; 8,2 e 30,7	WS
<b>Direção do vento</b>	Met One 020C	64,1	WD
Pluviômetro	Texas Electronics 076B- 4	42,6	Precipitação

### 3.3 Estimativas de variáveis

#### 3.3.1 Estoque de calor na biomassa

O estoque de energia,  $S$ , armazenado na floresta, não é uma das tarefas mais fáceis de se realizar, uma vez que se pode ter um armazenamento nas folhas, troncos, ramos, galhos, e serrapilheira. Para conseguir um melhor fechamento no balanço de energia, foi utilizada a parametrização proposta por Michiles e Gielow (2008) para calcular o estoque de calor no ar (equação 12c) e na biomassa que correspondeu à energia armazenada nos troncos (equação 14b), galhos, ramos, folhas e liteira (equação 15b). Para tanto, foram utilizadas medidas de temperatura e umidade específica do ar em dois pontos da torre experimental. Entretanto, devido a ausência de medidas de umidade específica, utilizou-se a expressão 13b adaptada de Reichardt (1996) para a transformação de valores de umidade relativa em umidade específica do ar.

#### 3.3.2 Análises estatísticas

Análise de regressão foi usada para estimar como  $LE+H+G+S$  se relacionavam com  $Q^*$ . O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), mediu a qualidade do ajuste linear simples. Quanto mais próximo o coeficiente de determinação estiver da unidade melhor será considerado o ajuste. Para testar a hipótese de que o coeficiente de correlação entre as variáveis envolvidas é igual a zero, contra a hipótese de que é diferente de zero, foi empregado a análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 0,05. Estas análises permitiram avaliar o fechamento do balanço de energia em cada uma das situações quando se incluía  $S$  ( $+S$ ) nos cálculos do fechamento do balanço de energia superficial e quando não se introduzia ( $-S$ ).

#### 3.3.3 Fração de Energia (FE)

A fração de energia foi definida através das equações 15a, 15b, 15c e 15d. Para se obter a fração de cada componente. O resultado dessa razão representou o percentual que cada componente usou da energia líquida disponível no sistema.

$$FE_{LE} = LE / Q^* \quad (15a)$$

$$FE_H = H / Q^* \quad (15b)$$

$$FE_G = G / Q^* \quad (15c)$$

$$FE_S = S / Q^* \quad (15d)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção estará compartimentado da seguinte forma: inicialmente será analisada na seção 4.1, a variação diária e mensal dos componentes do Saldo de Radiação e Albedo. Em seguida nas seções 4.2 e 4.3 serão abordadas a variação diária e mensal de fluxo de  $H$  e  $LE$ , respectivamente para os três sítios. Posteriormente, na seção 4.4, será analisada a variação horária da taxa de armazenamento de energia térmica (TAE) para o Campo Agrícola (km 77), Floresta Manejada (km 83) e Primária (km 67). Na seção 4.5 serão apresentados os valores horários das componentes do balanço de Energia em  $W.m^{-2}$ . Na seção 4.6, será apresentado o percentual que cada componente usou da energia líquida disponível no sistema, ou seja, a fração em porcentagem de cada componente consumiu de  $Q^*$  e finalizando com a seção 4.7 Fechamento do Balanço de Energia Superficial (FBES), os valores residuais horários e a regressão linear entre o somatório dos fluxos de energia  $LE+H+G+S$  vs  $Q^*$  para os três sítios.

Para todos os termos que compõe a taxa de armazenamento de energia térmica acima do solo ( $S_T$ ,  $S_q$ ,  $S_r$ ,  $S_g$ ,  $S_s$ ,  $S_f$ ,  $S_{lt}$ ,  $S_{oc}$ ), e os componentes do balanço de energia, foram calculados nos seguintes períodos: de 2001 a 2005 para o sitio de Campo Agrícola (km 77); de 30 de junho de 2000 a 13 de março de 2004 para o sítio da Floresta Manejada e de 2 de janeiro de 2002 a 18 de janeiro de 2006 para o sitio de Floresta Primária (km 67).

### 4.1 Componentes do Saldo de Radiação

Encontrou-se no Campo Agrícola valores médios diários para o saldo de radiação de onda curta ( $S^*$ ) de  $165 \pm 38,5 W.m^{-2}$  (figura 14a). Na figura 14b, os baixos valores do saldo de radiação de ondas longas ( $L^*$ ) estão relacionados com a emissão de radiação da superfície ( $L\uparrow$ ). Observou-se que os altos valores de  $S^*$ , conseqüentemente ocasionava maior aquecimento na superfície aumentando a emissão de  $L\uparrow$ , que pode ser vista no final do ano de 2001, 2002 e no início do ano de 2005 alcançando valores máximos de  $-90 W.m^{-2}$  (o sinal negativo indica que a radiação está saindo da superfície).

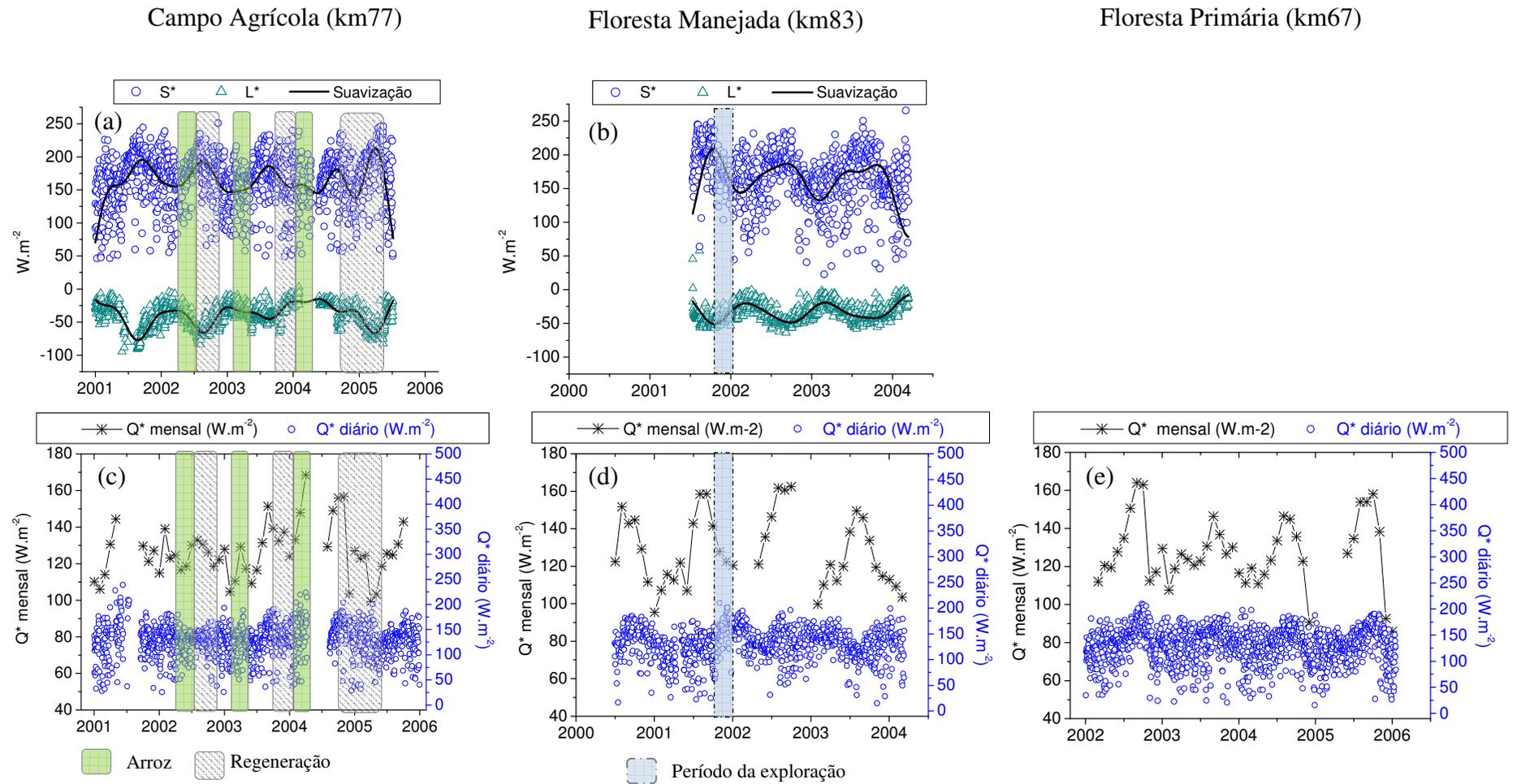
Os valores dessa magnitude de onda longa coincidem com áreas quando a superfície estava com pouca vegetação (arado e descanso, ver figura 14a) e que veio a culminar com os períodos secos (geralmente situados do meio para o final dos ano) aumentando dessa forma a amplitude térmica da superfície e, conseqüentemente, da parcela de ar logo acima da superfície.

Para a Floresta Manejada, (figura 14b) os valores de  $S^*$  foram similares aos obtidos no Campo Agrícola, por volta de  $167,5 \pm 38,9 W.m^{-2}$ , entretanto, observou-se que a magnitude

dos valores das médias diárias de ( $S^*$ ), tanto no Campo Agrícola quanto na floresta variou muito, isso ocorreu devido à presença de nuvens que impedem a incidência direta da radiação solar na superfície. Note que essas variações diárias são maiores nos períodos chuvosos ocorrido nos inícios dos anos tanto na floresta quanto no Campo Agrícola .

Ainda na figura 14b, valores das médias diárias  $L^*$  obtidos na Floresta Manejada foram aproximadamente  $-34,1 \pm 13,5 \text{ W.m}^{-2}$ . Já no Campo Agrícola, os valores de  $L^*$  foram  $-39,1 \pm 17,9 \text{ W/m}^2$ . Portanto, essa diferença pode estar associada devido à presença da vegetação de grande porte que compõe a Floresta Manejada, onde a cobertura vegetal impede grande parte da radiação solar direta no solo, diminuindo a temperatura e a perda de ondas longas da superfície.

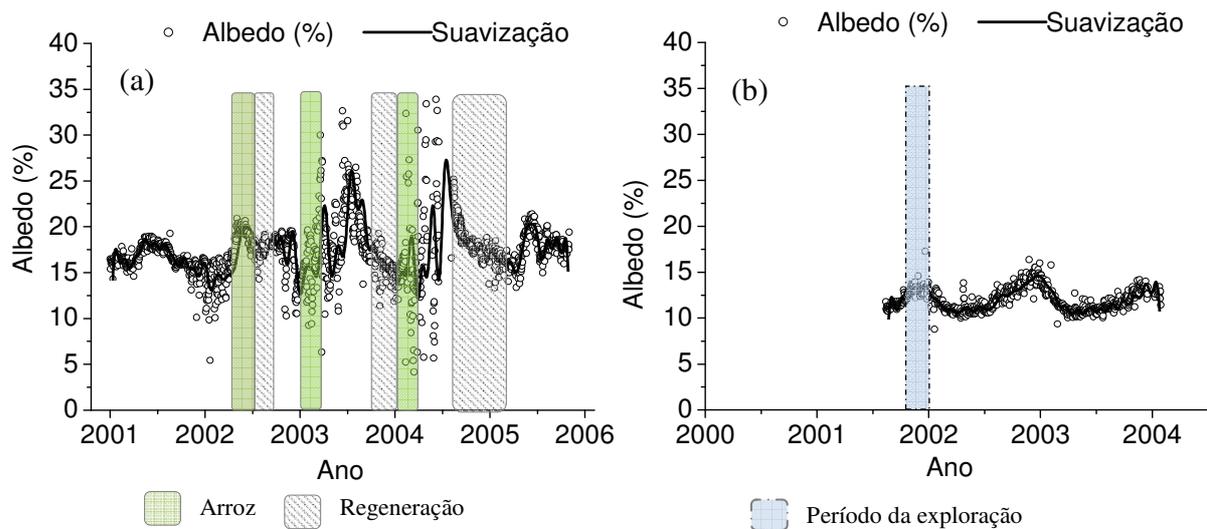
Os valores das médias diárias do saldo de radiação disponíveis ( $Q^*$ ) no Campo Agrícola, Floresta Manejada e Floresta Primária foram respectivamente  $127,74 \pm 31,6 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $131,0 \pm 31,4 \text{ W.m}^{-2}$  e  $130,6 \pm 33,1 \text{ W.m}^{-2}$ . Portanto, em geral verificou-se que tanto na Floresta Manejada quanto na Floresta Primária os valores de  $Q^*$  foram maiores em média até 2,5% a mais em relação ao Campo Agrícola. Isto advém do fato de que a floresta reflete menos radiação solar e emite menos radiação de ondas longas, dessa forma, disponibilizando mais energia para o sistema.



**Figura 14** – Variação diária e mensal de  $S^*$ ,  $L^*$  e  $Q^*$  para Campo Agrícola (a e c); Floresta Manejada (b e d) e Floresta Primária (e)

Na figura 15 podemos verificar a variação diária do albedo para o Campo Agrícola e Floresta manejada, cujos valores em média foram, respectivamente,  $17,2 \pm 3,1\%$  e  $11 \pm 1,2\%$ . Esse valores foram similares aos resultados encontrados por Fisch et al. (1998) com 21,6% para área de pastagem e 12,5% na floresta. Esse resultados também estão de acordo com Nobre et al. (1996) com valores de albedo 18% e 13% para áreas de pastagem e floresta.

No Campo Agrícola, observou-se maior variação da magnitude do albedo do que na área de Floresta Manejada, onde se observou variação sazonal bem definida com menores valores nos período mais chuvosos e maiores nos período menos chuvosos. Isso pode estar associado com a frequência de molhamento do dossel, pois a presença da água depositada provavelmente induziu a diminuição nos índices de reflexão de radiação incidente, ou seja, aumentou a transmissividade da radiação de ondas curtas. Tal comportamento foi diferente no Campo Agrícola, onde o albedo variou preponderantemente devido à mudança da cobertura do terreno.



**Figura 15** – Variação diária do albedo para (a) Campo Agrícola e b) Floresta Manejada

#### 4.2 Fluxo de calor sensível ( $H$ )

O Fluxo de  $H$  é a parte da energia transferida quando há diferença de temperatura entre a superfície e o ar adjacente e transmitido para as camadas atmosféricas superiores por processo de convecção apresentado na figura 16 (a, b e c) para os sítios de Campo Agrícola, Floresta Manejada e Floresta Primária, respectivamente. A variação das médias mensais da temperatura do ar na figura 16 (d, e e f).

Notou-se uma relação entre a variação da temperatura e o fluxo de  $H$  ao longo dos anos para todos os três sítios. Para o Campo Agrícola, esses valores máximos encontrados

podem estar relacionados a diferentes condições de superfície do Campo Agrícola, além desses aumentos de  $H$  coincidirem com épocas onde o solo encontrava-se em condição de arado e descanso (figura 16a), ou seja, com pouca cobertura vegetal, dessa forma, expondo o solo à radiação solar direta aquecendo mais a superfície alterando o fluxo de  $H$  para que seja o maior consumidor de energia disponível e conseqüentemente aumentando amplitude térmica que vem a culminar com período seco (figura 16d)

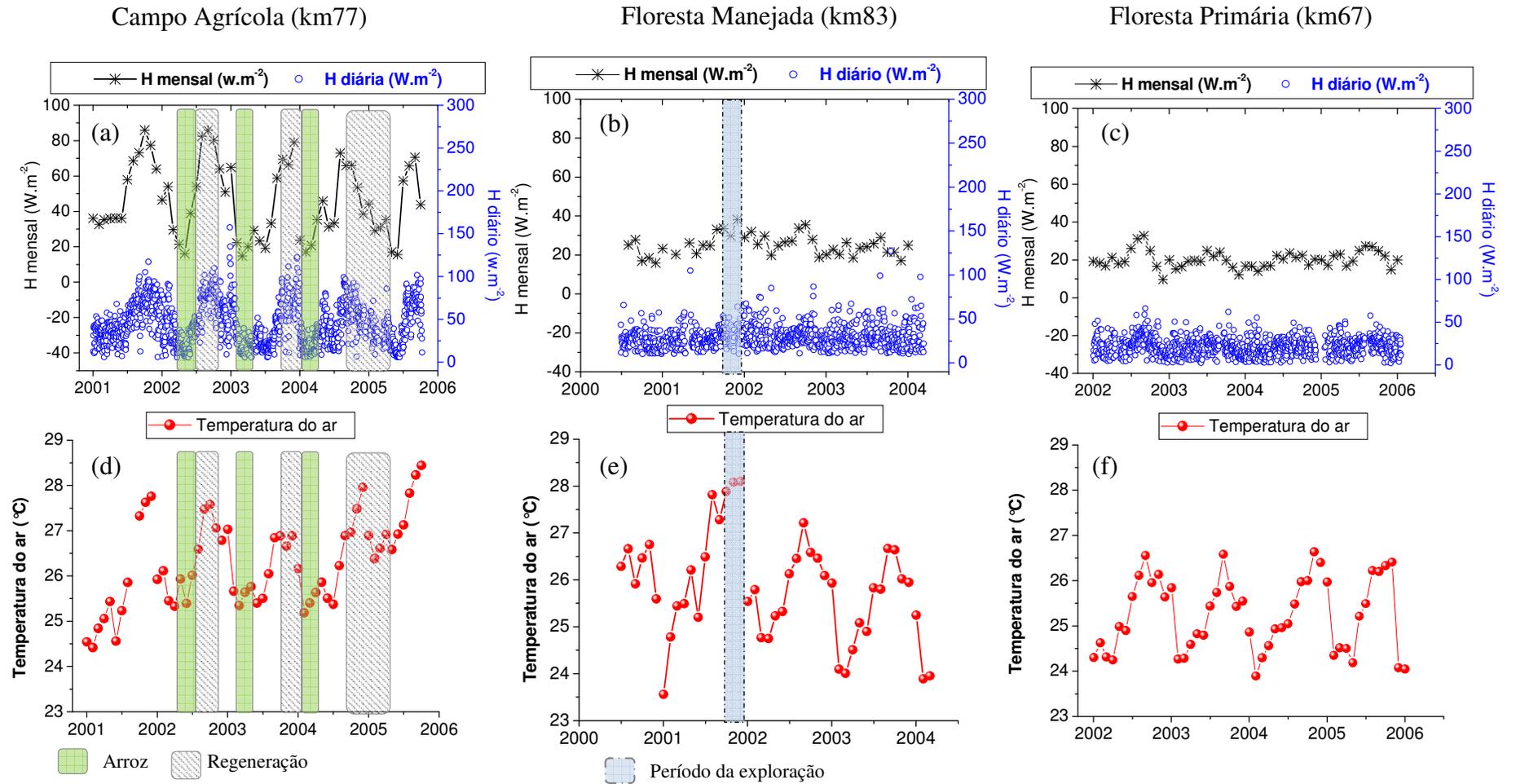
Observou-se maiores valores de  $H$  no Campo Agrícola, cujas médias foram  $44,8 \pm 28,8 \text{ W.m}^{-2}$ , ou seja, 108,4% a mais em relação à Floresta Primária (tabela 5). Além disso, no Campo Agrícola verificou-se maior variação na amplitude de  $H$  com menores valores ( $\sim 15 \text{ W.m}^{-2}$ ) no início dos anos e maiores valores ( $\sim 86 \text{ W.m}^{-2}$ ) nos meses finais dos anos, coincidindo com o período, cuja condição da superfície estava descoberta (arado e abandonada).

Para a Floresta Manejada no km 83, os valores de  $H$  foram em média 37% maior que encontrado na Floresta Primária (tabela 5). Notou-se que a variação da amplitude de  $H$  tanto na Floresta Manejada como na primária não foi tão expressiva durante todos os anos de análise do que obtido no Campo Agrícola. Além disso, verificou-se que durante o período de exploração na Floresta Manejada (figura 16b), os valores de  $H$  aumentaram severamente, e retornou para os valores semelhantes ao período do pré-corte por 3 anos (início de 2004), como observado em Miller et al. (2011), onde o fluxo de  $H$  sobre a Floresta Manejada aumentou fortemente em relação sitio de controle (floresta Primária).

**Tabela 5** - Médias diárias de Saldo de radiação de onda curta ( $S^*$ ) e saldo de radiação de onda longa ( $L^*$ ), e médias mensais do saldo de radiação ( $Q^*$ ) fluxo de calor de sensível ( $H$ ), fluxo de calor latente ( $LE$ ), Temperatura do ar ( $Tar$ ) Umidade do solo ( $U_{solo}$ ).

	$S^{*[1]}$ ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$L^{*[1]}$ ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$Q^{*[2]}$ ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$H^{[2]}$ ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$LE^{[2]}$ ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$Tar^{[2]}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$U_{solo}^{[2]}$ ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ )
<b>Campo agrícola</b>	$165,38 \pm$	$-39,1 \pm$	$127,74 \pm$	$44,8 \pm$	$73,8 \pm$	$26,28 \pm$	$0,268 \pm$
<b>(km77)</b>	38,5	17,9	31,6	24,8	36,8	0,9	0,55
<b>Floresta Manejada</b>	$167,5 \pm$	$-34,1 \pm$	$131,0 \pm$	$29,5 \pm$	$117,9 \pm$	$25,8 \pm$	$0,445 \pm$
<b>(km83)</b>	38,8	13,5	31,4	12,0	31,8	1,1	0,04
<b>Floresta Primária</b>	--	--	$130,6 \pm$	$21,48 \pm$	$89,12 \pm$	$25,24 \pm$	--
<b>(km67)</b>			33,1	10,2	24,4	0,8	

<sup>[1]</sup>Médias diárias; <sup>[2]</sup>Médias mensais



**Figura 16** – Variação diária e mensal de  $H$  e Temperatura do ar para Campo agrícola (a e d); Floresta Manejada (b e e) e Floresta Primária (c e f)

### 4.3 Fluxo de calor latente (*LE*)

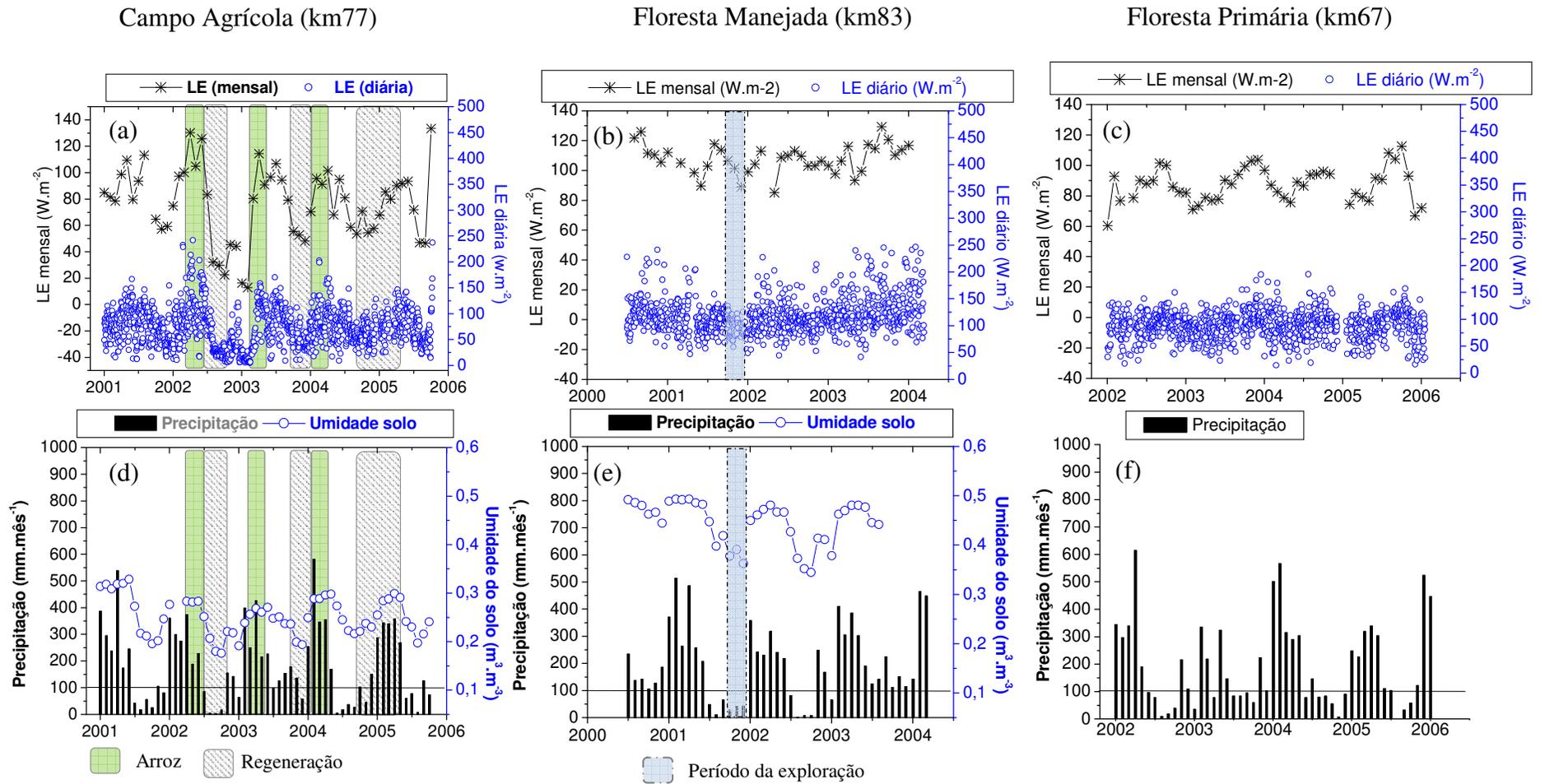
Observou-se maiores valores médios diários de *LE*, na Floresta Manejada (tabela 5), com valores médios de  $117,9 \pm 31,8 \text{ W.m}^{-2}$ . Isso corresponde à aproximadamente 32% a mais do que na Floresta Primária.

Com relação ao Campo Agrícola (figura 17a), observou-se um aumento nos valores de *LE* no período quando foi inserida a cultura de arroz (no período entre fevereiro e maio de 2002, janeiro e abril de 2003 e entre janeiro e março de 2004). Esse aumento nos valores de *LE* pode estar relacionado com a mudança da condição de superfície local, uma vez que, ao substituir a condição de arado pela plantação de arroz, isso fez com que aumentasse a disponibilidade hídrica para a atmosfera que possivelmente fora intensificada pela transpiração da cultura de arroz. Além disso, o fato dessa plantação ocorrer nos períodos chuvosos, também pode ter contribuído para as trocas de vapor entre a superfície e atmosfera e, conseqüentemente, no aumento dos valores de *LE*, devido à evaporação após a precipitação. Desta forma, o conteúdo de umidade do solo pode ser um fator determinante para as trocas de calor, vapor entre o ecossistema e atmosfera.

Para a Floresta Manejada e primária, não houve expressiva variação da amplitude no fluxo *LE* ao longo dos anos. Mesmo em período com baixa precipitação e (figura 17d, 17e e 15f). Isto pode estar relacionado com a presença da floresta, pois ela possivelmente manteve a disponibilidade hídrica na atmosfera transportando-a através da transpiração da floresta, onde as raízes das plantas extraíam água do subsolo, disponibilizando para a atmosfera e conseqüentemente, sustentando o fluxo de *LE* por todo o ano para os sítios de florestas.

Verificou-se também que durante o período de exploração na Floresta Manejada (figura 17b), os valores de *LE* foram menores, e apenas retornaram para os valores similares ao período do pré-corte por 3 anos (início de 2004), como observado em Miller et al. (2011), no qual segundo o autor, a razão entre *H* e *LE* (a razão de bowen) aumentou de 0,2 para 0,3 sobre sítio manejado no primeiro ano depois do corte, mas retornou para a taxa do pré-corte por 3 anos.

Devido à perda da copa, e a não mudança do  $Q^*$ , implica que a diminuição do fluxo de *LE* foi guiada pela perda de copa e não por uma mudança na energia disponível. Dessa forma, podemos observar a importância de minimizar a destruição da cobertura vegetal, pois provoca severas mudanças em alguns processos-chaves do ecossistema, como o fluxo de vapor d'água para a atmosfera.



**Figura 17** – Variação diária e mensal de *LE*, Umidade do solo e Acumulo de precipitação para Campo agrícola (a e d); Floresta Manejada (b e e) e Floresta Primária (c e f)

#### 4.4 Variação horária da taxa de armazenamento de energia térmica (TAE) para o Campo Agrícola (km7), Floresta Manejada (km 83) e Primária (km 67).

Na figura 18 podemos observar a variação horária dos termos da TAE, os quais são:  $S_{ar}$  ( $S_T$  e  $S_q$ ),  $S_{tr}$  e  $S_{um}$  ( $S_g, S_r, S_{lt}, S_f$  e  $S_{oc}$ ), onde a somatória de todos constitui a Taxa de Armazenamento de Energia ( $S$ ), para os três sítios. Assim, observou-se que os termos da TAE no ar, em geral, tendem a deslocar os valores máximos de  $S$  para as primeiras horas da manhã. Os quais cominaram em picos positivos para o Campo Agrícola, Floresta Manejada e Primária, respectivamente, em até  $8,4 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $60,4 \text{ W.m}^{-2}$  e  $57,7 \text{ W.m}^{-2}$  (por volta das 9 h); e negativos com  $-3,7 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $-39,0 \text{ W.m}^{-2}$  e  $-33,76 \text{ W.m}^{-2}$  (por volta das 18 h) na variação horária da TAE total.

No sítio do Campo Agrícola (km77), calculou-se apenas as componentes  $S_{ar}$  ( $S_T$  e  $S_q$ ), pois nesse sítio não foi encontrada biomassa de grande porte, para se calcular os termos de armazenamento na biomassa ( $S_g, S_r, S_{lt}, S_f$  e  $S_{oc}$ ). Mas, nos sítios da Floresta Manejada (km83) e primária (km67), a fração de  $S_{ar}$  ( $S_{ar}/S$ ) correspondeu em média 29,68% e 28,94% , respectivamente, para os sítios.

O comportamento horário de  $S_{tr}$  foi caracterizado pelos valores negativos durante a noite, tornando-se positivo por volta das 6 h na Floresta Manejada e Primária, e que aumentou até as 10 h e 9 h, respectivamente, à 57,96% e 46,71% de  $S$ , alcançando valores como  $30,18 \text{ W.m}^{-2}$  e  $26,17 \text{ W.m}^{-2}$ . Por volta das 15h, novamente os valores de  $S_{tr}$  se tornam negativos na Floresta Manejada e Primária, cujos valores foram  $-18,85 \text{ W.m}^{-2}$  e  $-15,77 \text{ W.m}^{-2}$ , correspondendo a 46,45% e 46,71% da fração da TAE ( $S_{tr}/S$ ). Esses valores foram em média 22% maior do que encontrado por Michiles e Gielow (2008) para floresta na Amazônia central, na reserva ecológica do Cuieiras, a 50 km à nordeste de Manaus, Brasil

Considerando o comportamento horário, os maiores valores observados para a  $S_{um}$  ( $S_g, S_r, S_{lt}, S_f$  e  $S_{oc}$ ) na Floresta Manejada e Primária foram  $16,20 \text{ W.m}^{-2}$  e  $14,05 \text{ W.m}^{-2}$  por volta das 9 h, contribuindo com 32% e 24% dos valores de  $S$  ( $S_{um}/S$ ). Seus valores mínimos aconteceram por volta das 18 h, cujos valores foram  $-10,03 \text{ W.m}^{-2}$  e  $-8,21 \text{ W.m}^{-2}$ , correspondendo em média a 24% para ambos os sítios.

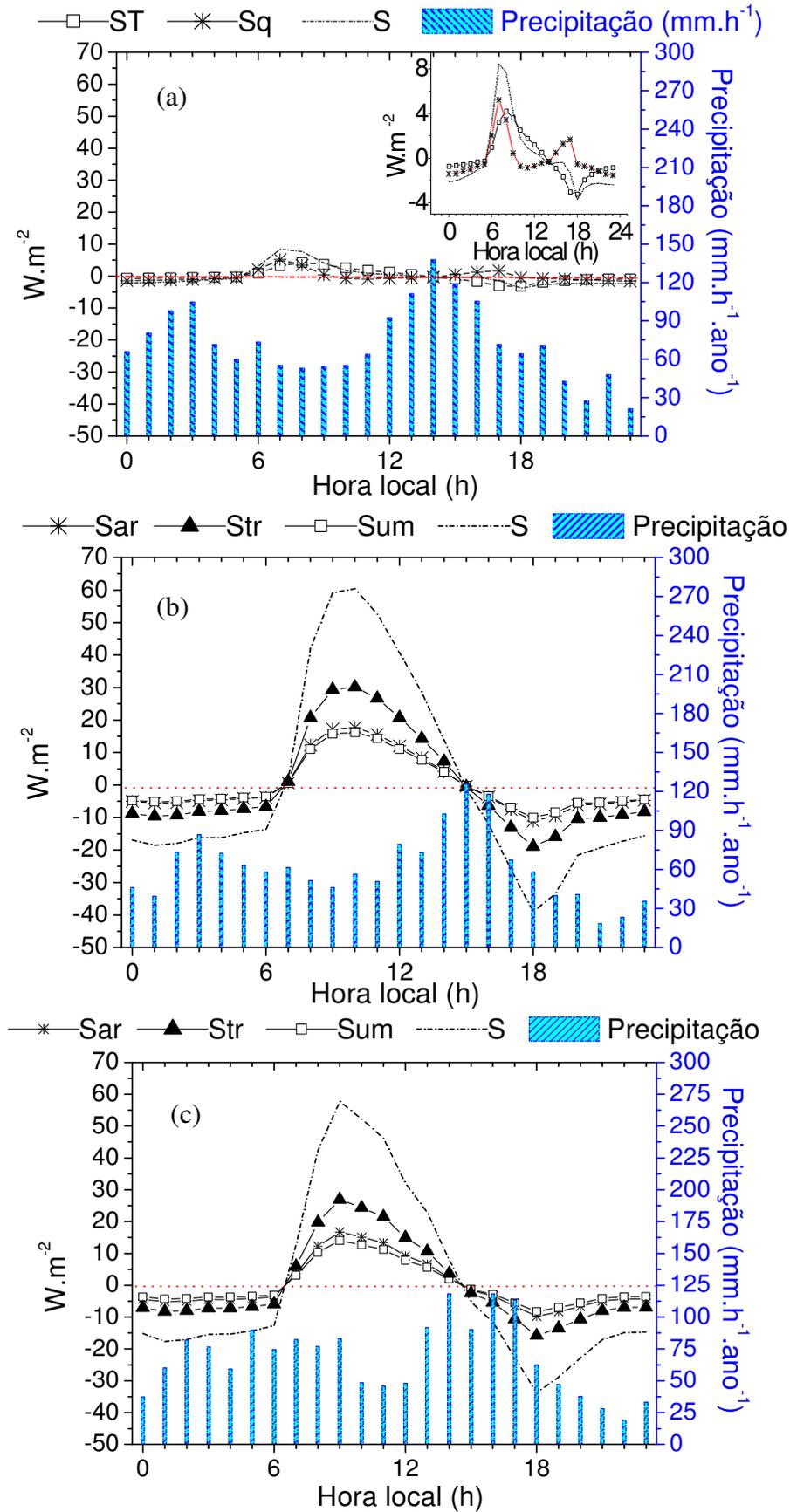
A TAE total ( $S$ ) no Campo Agrícola, Floresta Manejada e Primária foi negativa antes do nascer e depois do pôr-do-sol (de 0 h a 6 h e 18 h a 23 h), em média igual a  $-1,91 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $17,09 \text{ W.m}^{-2}$  e  $-20 \text{ W.m}^{-2}$ , respectivamente, correspondendo a  $6,28 \pm 0,2\%$ ,  $49,78 \pm 0,35\%$  e  $90,30 \pm 1,8\%$  do valor de  $Q^*$  para os sítios no período noturno. Durante o período do dia (entre 6 h e 18 h) a TAE foi positiva, cujos valores em média foram  $1,55 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $14,42 \text{ W.m}^{-2}$  e  $16,54 \text{ W.m}^{-2}$  para o Campo Agrícola, Floresta Manejada e Primária, respectivamente.

Correspondendo a  $-1,04 \pm 8,14\%$ ,  $20,9 \pm 46,1\%$  e  $22,15 \pm 45,6\%$  do valor de  $Q^*$  para os três sítios no período diurno.

Em geral (tabela 6), observou-se que os valores de  $S$  dependem das condições climáticas, mas os valores de  $S/Q^*$  corresponderam entre  $-27,5\%$  e  $9,3\%$  para o Campo Agrícola,  $-39,22\%$  e  $153,5\%$  para a Floresta Manejada e  $-20,85$  e  $157,39\%$  para a Floresta Primária. Portanto, para os dias com altos valores de  $Q^*$ , os valores de  $S$  foram positivos, indicando a absorção de energia pela floresta.

**Tabela 6** - Taxas (%) envolvendo  $S$ ,  $S_{ar}$ ,  $S_{tr}$ ,  $S_{um}$  e  $Q^*$ , mais acumulação de precipitação pluviométrica  $P$  (mm), para Campo Agrícola (km77), Floresta Manejada (km83) e Floresta Primária (km67).

Sítio	$S_{ar}/S$	$S_{tr}/S$	$S_{um}/S$	$\overline{\left(\frac{S}{Q^*}\right)}_{dia}$	$\overline{\left(\frac{S}{Q^*}\right)}_{noite}$	$(S/Q^*)_{min}$	$(S/Q^*)_{max}$	$P$
<b>Km77</b>	-	-	-	$-1,04 \pm 8,14$	$7,45 \pm 1,15$	-27,5	9,3	8467,093
<b>Km83</b>	29,68	50,53	27,19	$20,9 \pm 46,1$	$49,78 \pm 4,2$	-39,22	153,5	5730,644
<b>Km67</b>	28,94	46,71	24,33	$22,15 \pm 45,6$	$90,3 \pm 21,6$	-20,85	157,39	6620,002



**Figura 18** – Variação horária da TAE do ar  $S_T$  e  $S_q$ , do tronco ( $Str$ ) e do restante da biomassa ou  $Sum$  ( $S_g, S_r, S_{lt}, S_f$  e  $S_{oc}$ ) para o (a) Campo Agrícola; (b) Floresta Manejada e (c) Floresta Primária.

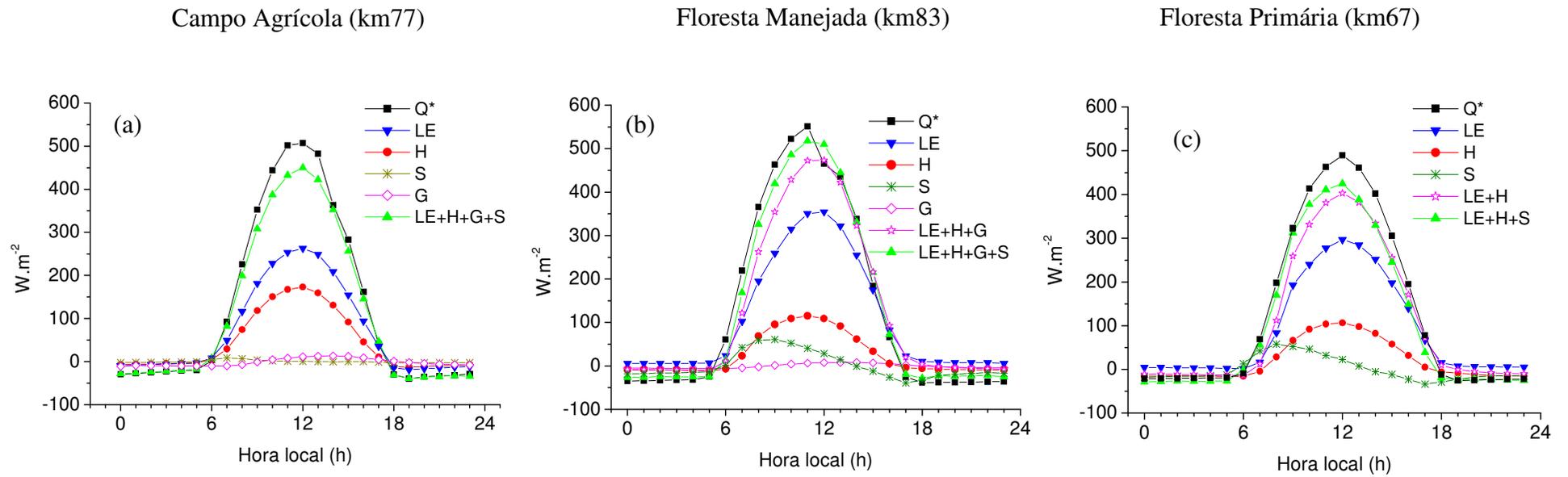
#### 4.5 Fluxo de energia

Na figura 19 foram observados padrões de médias horárias da radiação líquida ( $Q^*$ ), dos fluxos de calor sensível ( $H$ ) e calor latente ( $LE$ ), fluxo de calor no solo ( $G$ ) e da energia armazenada no ar e na biomassa ( $S$ ). O fluxo de energia variou de acordo com a hora. Na tabela 7, podemos observar que nas áreas de floresta os valores de  $Q^*$  foram maiores do que no Campo Agrícola, cujos valores em média foram  $129,4 \pm 205,3 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $134,5 \pm 220,3 \text{ W.m}^{-2}$  e  $130,6 \pm 195,7 \text{ W.m}^{-2}$  para o Campo Agrícola, Floresta Manejada e primária, respectivamente.

Observou-se também que houve o fluxo de  $LE$  foi predominante em áreas de floresta, que no Campo Agrícola, com valores em média  $73,3 \pm 107,3 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $105,8 \pm 132,2 \text{ W.m}^{-2}$  e  $88,1 \pm 111,9 \text{ W.m}^{-2}$  para o Campo Agrícola, Floresta Manejada e primária, respectivamente. Em contrapartida, o fluxo  $H$  foi maior no Campo Agrícola com 115% maior que na Floresta Primária (tabela 7).

Durante o dia, entre 6 h e 18 h, o fluxo de  $G$  foi 96% maior que encontrado na floresta Manejada (medidas de fluxo de  $G$  na Floresta Primária não foram feitas), com  $5,3 \pm 11,3 \text{ W.m}^{-2}$  e  $2,7 \pm 4,8 \text{ W.m}^{-2}$  para o Campo Agrícola e Floresta Manejada, respectivamente.

Com relação aos valores de  $S$ , durante o período diurno (entre 6 h e 18 h), verificou-se maiores valores nas áreas de floresta que no Campo Agrícola, cujos valores em média foram  $1,6 \pm 3,1 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $14,4 \pm 33,8 \text{ W.m}^{-2}$  e  $10,5 \pm 33,3 \text{ W.m}^{-2}$  para o Campo Agrícola, Floresta Manejada e primária, respectivamente..



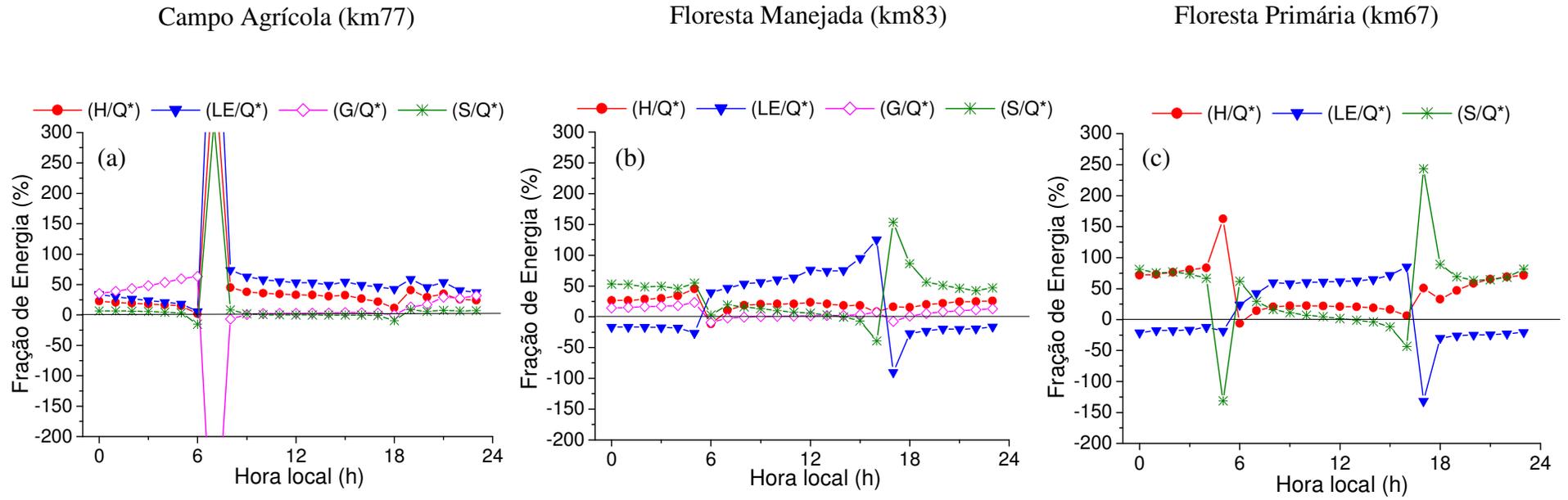
**Figura 19** – Variação horária de  $Q^*$ ,  $LE$ ,  $H$ ,  $G$ ,  $S$  e ( $LE+H+G+S$ ) para (a) Campo Agrícola; (b) Floresta Manejada e (c) Floresta Primária.

**Tabela 7** - Médias horárias de Saldo de radiação ( $Q^*$ ), fluxo de calor latente ( $LE$ ), fluxo de calor de sensível ( $H$ ), Fluxo de calor no solo e Energia Armazenada ( $S$ ) para os três sítios.

Sítio e Período	$Q^*$ ( $W.m^{-2}$ )	$LE$ ( $W.m^{-2}$ )	$H$ ( $W.m^{-2}$ )	$G$ ( $W.m^{-2}$ )	$S$ ( $W.m^{-2}$ )
<b>Campo agrícola</b>					
<b>Diurno</b>	264,2 ± 201,1	144,5 ± 102,6	86,9 ± 64,2	5,3 ± 11,3	1,6 ± 3,1
<b>Noturno</b>	-29,8 ± 22,0	-10,9 ± 9,9	-7,44 ± 4,7	-10,2 ± 3,9	-2,0 ± 0,5
<b>Total</b>	129,4 ± 205,3	73,3 ± 107,3	43,6 ± 66,3	-1,8 ± 10,9	-0,04 ± 3,0
<b>Floresta Manejada</b>					
<b>Diurno</b>	277,5 ± 197,3	189,8 ± 123,2	53,4 ± 46,4	2,7 ± 4,8	14,4 ± 33,8
<b>Noturno</b>	-34,4 ± 3,7	6,5 ± 1,0	-9,4 ± 1,0	-4,6 ± 1,2	-17,1 ± 2,2
<b>Total</b>	134,5 ± 220,3	105,8 ± 132,2	24,6 ± 47,1	-0,6 ± 5,12	-0,01 ± 30,6
<b>Floresta Primária</b>					
<b>Diurno</b>	258,5 ± 186,5	159,2 ± 109,9	50,1 ± 44,4	-	10,5 ± 33,3
<b>Noturno</b>	-20,4 ± 3,9	4,2 ± 1,4	-14,8 ± 1,2	-	-12,8 ± 8,6
<b>Total</b>	130,6 ± 195,7	88,1 ± 111,9	20,3 ± 46,1	-	-0,2 ± 27,4

#### 4.6 Fração de Energia

Observou-se alguns padrões horários na fração de energia: durante o período diurno verificou-se que a maior parte da energia disponível foi utilizada para evapotranspiração ( $LE$ ) para os três sítios, com  $50,3 \pm 18,6\%$ ,  $49,7 \pm 54,6\%$  e  $37,6 \pm 58,2\%$  para o Campo agrícola, Floresta Manejada e Primária, respectivamente. Porém, na transição do período diurno para o noturno, observou-se uma inversão nos fluxos apenas nas áreas de floresta, no qual  $S$  e  $H$  se tornaram dominantes ao invés de  $LE$  (tabela 8). Isso pode ser devido à diminuição da fração de  $LE$  durante a noite, quando ocorreu a condensação e, dessa forma, liberação de energia para outros fluxos o que pode ter aumentado os valores de  $H/Q^*$  e  $S/Q^*$  nas áreas de floresta. Tal fato não ocorreu no Campo Agrícola, pois os valores de  $LE/Q^*$  foi predominante, exceto nas primeiras horas do dia (de 0 h às 6 h, figura 20), onde o  $G/Q^*$  se tornou preponderante (tabela 8).



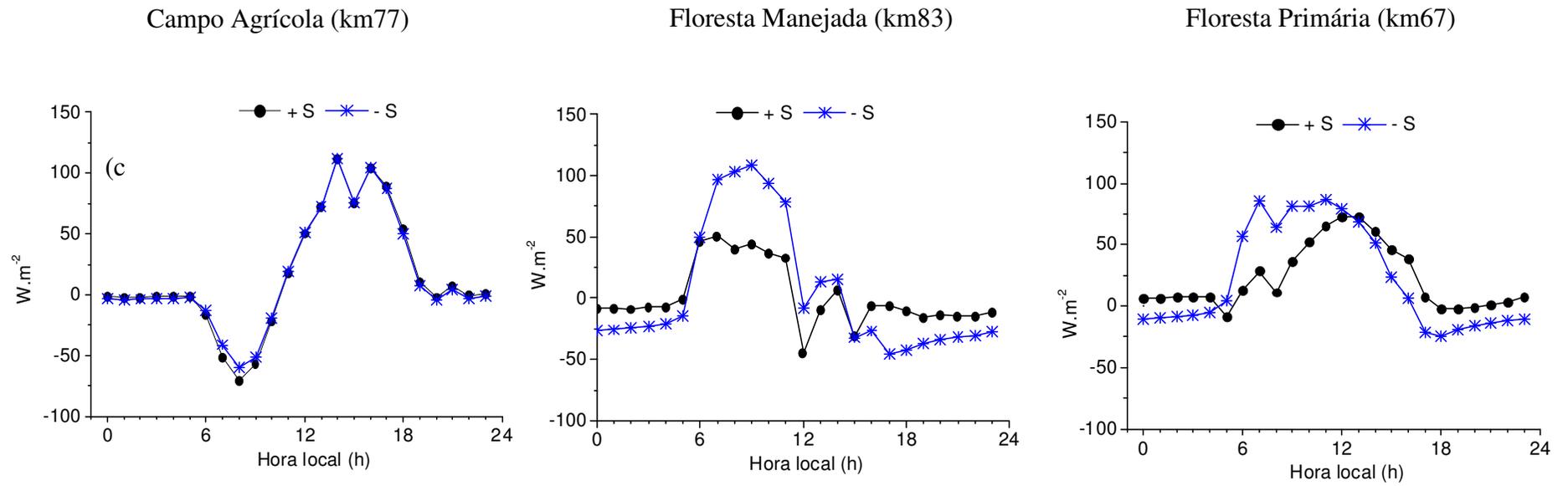
**Figura 20** - Variação horária da fração de  $(H/Q^*)$ ,  $(LE/Q^*)$ ,  $(G/Q^*)$  e  $(S/Q^*)$  para (a) Campo Agrícola; (b) Floresta Manejada e (c) Floresta Primária.

**Tabela 8** - Variação horária da fração de ( $H/Q^*$ ), ( $LE/Q^*$ ), ( $G/Q^*$ ) e ( $S/Q^*$ ) para (a) Campo Agrícola, Floresta Manejada e Floresta Primária.

Sítio e Período	$H/Q^*$ (%)	$LE/Q^*$ (%)	$G/Q^*$ (%)	$S/Q^*$ (%)
<b>Campo agrícola</b>				
Diurno	28,6 ± 11,4	50,3 ± 18,6	6,9 ± 23,3	0,05 ± 3,1
Noturno	24,3 ± 8,4	35,4 ± 12,1	36,13 ± 15,7	6,64 ± 4,4
<b>Floresta Manejada</b>				
Diurno	15,4 ± 9,2	49,7 ± 54,6	0,06 ± 4,3	20,9 ± 48,2
Noturno	27,9 ± 6,8	-19,0 ± 3,1	13,8 ± 5,0	49,7 ± 4,2
<b>Floresta Primária</b>				
Diurno	20,1 ± 13,0	37,6 ± 58,2	-	31,0 ± 7,1
Noturno	77,2 ± 29,8	-20,1 ± 4,1	-	53,4 ± 61,6

#### 4.7 Fechamento do Balanço de Energia superficial (FBES)

Na figura 21, podemos verificar a variação horária da diferença residual entre o saldo de radiação ( $Q^*$ ) e a somatória dos fluxos de energia incluindo  $S$  ( $+S$ ) e não incluindo ( $-S$ ). Para o período analisado, calculando-se as médias residuais incluindo  $S$  ( $+S$ ), cuja equação foi [ $Q^* - (LE+H+G+S)$ ], verificaram-se valores em média de  $15,36 \pm 48,6 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $1,77 \pm 25,7 \text{ W.m}^{-2}$  e  $22,37 \pm 26,1 \text{ W.m}^{-2}$  para os sítios do km 77, km 83 e km 67 respectivamente (tabela 9). Quando  $S$  não foi incluído no cálculo residual ( $-S$ ), o qual foi [ $Q^* - (LE+H+G)$ ], observou-se valores de  $15,55 \pm 48,6 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $4,57 \pm 52,4 \text{ W.m}^{-2}$  e  $22,14 \pm 41,9 \text{ W.m}^{-2}$  para os sítios do km77, km83 e km67 respectivamente. Notou-se que ao incluir o termo  $S$ , as médias residuais foram menores para todos os sítios com exceção do km67, em que houve um leve aumento em até  $0,23 \text{ W.m}^{-2}$ . Verificou-se também que a inclusão de  $S$  no balanço de energia superficial (FBES) diminuía as médias residuais no período do dia (6 h às 18 h) para todos os três sítios (tabela 9).



**Figura 21** – Variação horária residual entre  $Q^*$  e somatória dos fluxos de energia incluindo e não incluindo  $S$  ( $+S$  e  $-S$ ), para (a) Sitio do Km77; (b) Km83 e (c) Km67.

**Tabela 9-** Fechamento do Balanço de Energia Superficial (FBES), imprecisão e valores residuais para os três sítios.

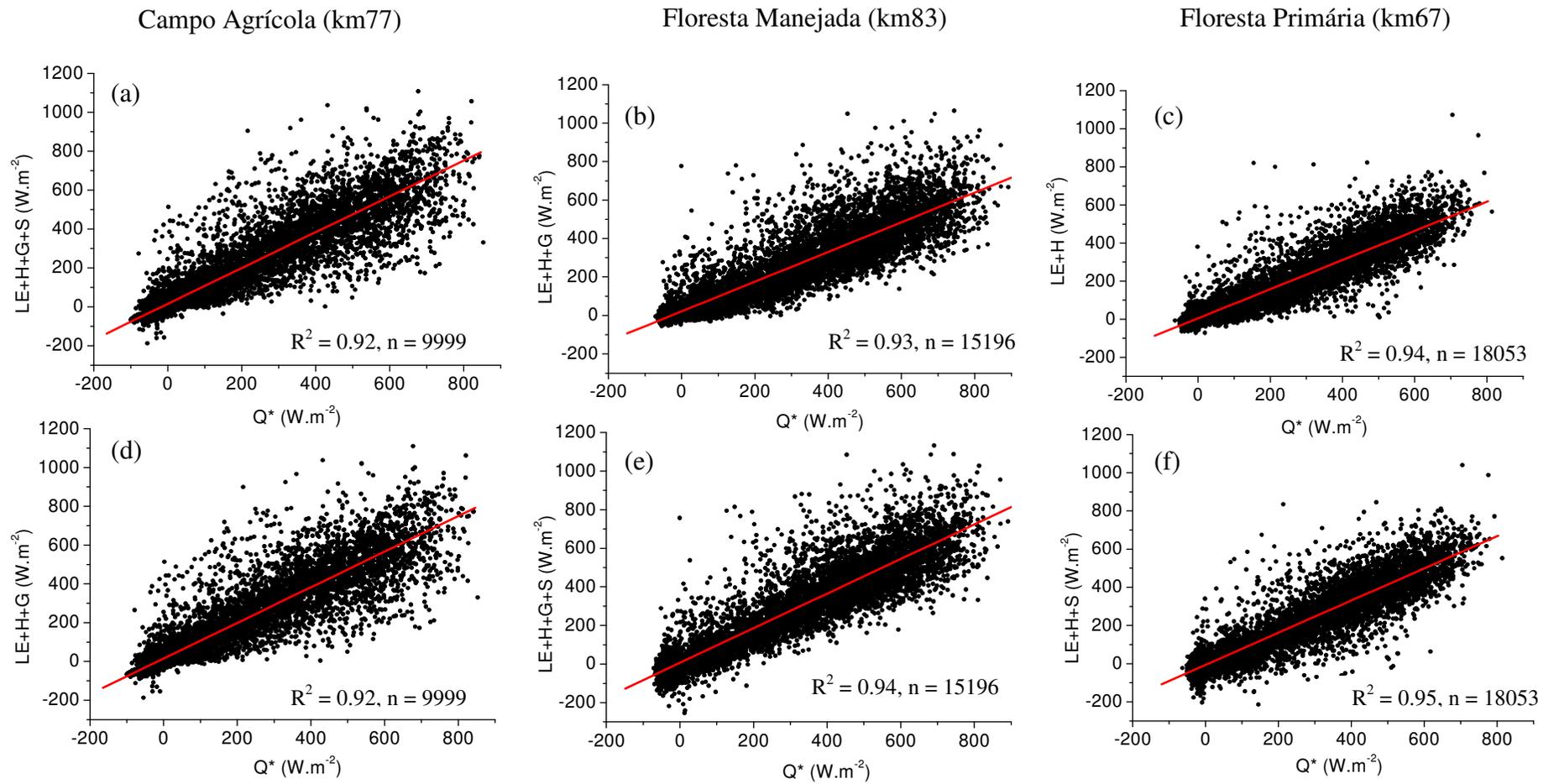
Sítio e Período	FBES (%)	Imprecisão (%)	Residual ( $W.m^{-2}$ )
<b>Campo Agrícola (km 77)</b>			
Diário (-S)	67	33,2	15,5 ± 46,8
Diário (+S)	70	30,3	15,3 ± 48,6
Diurno (-S)	39	60,7	29,90 ± 60,8
Diurno (+S)	38	61,8	27,90 ± 64,4
Noturno (-S)	99	0,6	-1,41 ± 3,9
Noturno (+S)	107	6,8	0,58 ± 4,1
<b>Floresta Manejada (km 83)</b>			
Diário (-S)	46	54,2	4,57 ± 52,4
Diário (+S)	80	20,1	1,77 ± 25,7
Diurno (-S)	65	34,7	31,12 ± 57,9
Diurno (+S)	86	13,8	11,62 ± 32,7
Noturno (-S)	23	77,3	-26,80 ± 6,3
Noturno (+S)	73	27,5	-9,87 ± 4,6
<b>Floresta Primária (km 67)</b>			
Diário (-S)	58	42,2	22,14 ± 41,9
Diário (+S)	99	0,9	22,37 ± 26,1
Diurno (-S)	58	42,2	49,16 ± 34,9
Diurno (+S)	89	11,2	38,58 ± 23,6
Noturno (-S)	58	42,2	-9,79 ± 6,1
Noturno (+S)	111	11,3	3,21 ± 5,3

A regressão linear entre valores horários de  $(LE+H+G+S)$  e de  $Q^*$  para o período analisado mencionado acima. Verificou-se que a inclusão de  $S$  no cálculo do Fechamento do Balanço de Energia Superficial (FBES) o melhorou no cômputo principalmente na Floresta Primária tanto nas horas diurnas quanto noturnas (tabela 9). Para a regressão linear incluindo todos os valores horários do período analisado, os Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram 0,92; 0,94 e 0,94 para o Campo Agrícola, Floresta Manejada e Primária, respectivamente (figura 22). A inclusão de  $S$  nos cálculos aumentou  $R^2$  em até em 0,17% para o Campo Agrícola, 1,5% para a Floresta Manejada e 0,03% para a Floresta, respectivamente, quando comparado com a regressão no qual  $S$  não foi incluída.

Embora se tenha verificado menor aumento de  $R^2$  na Floresta Primária com a inclusão de  $S$  nos cálculos, observou-se, contudo, que as médias foram significativamente diferentes ( $p = 0,012$  para  $\alpha = 0,05$ ). No Campo Agrícola e Floresta Manejada os valores de  $p$  com  $\alpha = 0,05$

foram 0,98 e 1,27. Este resultado contrariou nossa hipótese de que a inclusão de *S* em área de floresta implicaria numa diferença significativamente nas médias.

Em geral os valores de  $R^2$  calculados no presente estudo foram maiores do que encontrado por Sakai et al. (2004) com  $R^2$  igual à 0,85 para o Campo Agrícola; Rocha et al. (2004) com  $R^2$  igual à 0,86 para a Floresta Manejado e Hutyra et al. (2007)  $R^2$  igual à 0,85 para a Floresta Primária.



**Figura 22** – Regressão linear entre os valores horários da somatória do fluxo incluindo e não incluindo  $S$  para o Campo Agrícola (a e d); Floresta Manejada (b e e) e Floresta Primária (c e f)

## 5 CONCLUSÕES

Com relação aos termos da TAE, o  $S_{tr}$  foi o termo dominante, correspondendo cerca de 50,56% e 46,71% do total de  $S$  para a Floresta Manejada e Floresta Primária, respectivamente. Outros componentes como  $S_{um}$  ( $S_g$ ,  $S_r$ ,  $S_f$ ,  $S_{lt}$  e  $S_{oc}$ ) juntos corresponderam aproximadamente 27,19% e 24,33% de  $S$  para os sítios de Floresta Manejada e Floresta Primária, respectivamente. O  $S_{ar}$  contribuiu 29,68% para os sítios de Floresta manejada e 28,94% para a Floresta Primária.

Na área de Floresta Manejada verificou-se uma variação do  $Q^*$  bem definida sazonalmente, com maiores valores no período menos chuvosos (seco) e menores valores nos períodos mais chuvosos (úmido), assim como albedo e  $S^*$ . Já para os valores de  $L^*$  verificou-se maiores valores nos períodos úmidos. Já no Campo Agrícola tanto o  $Q^*$  quanto seus componentes ( $S^*$  e  $L^*$ ) e albedo estavam relacionados ao tipo de condição de superfície.

Fluxo de calor  $G$  foi um termo considerável no FBES em área de Campo Agrícola correspondendo do  $Q^*$  ( $G/Q^*$ ) em até  $6,9 \pm 23,3\%$  para diurno e  $36,13 \pm 15,7\%$  para noturno. Isso pode ter ocorrido devido ao alto aquecimento da superfície por conta do aumento da incidência direta dos raios solares no solo. Já em área de Floresta,  $S$  foi um termo considerável no FBES, com  $20,9 \pm 48,2\%$  para período diurno e  $49,7 \pm 4,2\%$  para o noturno na Floresta Manejada. Na Floresta Primária, os valores diurnos e noturnos corresponderam a  $31,0 \pm 7,1\%$  e  $53,4 \pm 61,6\%$  de  $Q^*$ , respectivamente.

Considerando as médias mensais, o fluxo de  $LE$  foi dominante por todo período analisado em áreas de florestas, exceto no Campo Agrícola, onde se verificou uma inversão nos fluxos de  $LE$  e  $H$ , principalmente no período em que o solo se encontrava arado e abandonado para regeneração (com pouca vegetação), culminando com período menos chuvoso.

O FBES, em termos horários foi melhor quando se incluiu  $S$  nos cálculos principalmente em área de Floresta. E se pôde concluir que  $S$  foi um importante componente do balanço de energia principalmente para área de Floresta Primária, devido à massiva biomassa, que combinada com altas e rápidas variabilidades na temperatura e umidade do ar, assim como curtas durações de alguns eventos de pancadas de chuva.

No entanto, o modelo de Michiles e Gielow (2008) usado para estimar o estoque de energia não foi suficientemente capaz de fechar o balanço de energia, conduzindo para a necessidade da construção de um modelo que permita comparar e avaliar, com mais consistência, o FBES quando se utiliza o método de correlação de vórtices turbulentos, cujas

medidas tenderam a subestimar a perda de energia durante a noite e o ganho de energia pelos sítios durante o dia.

Em vista dessas comparações e análises é indispensável que novos modelos para estimar os componentes do Balanço e estoque de energia armazenada sejam buscados, a fim de avaliar com mais confiança os dados, aumentando a certeza no pós-processamento do sistema de correlação de fluxos turbulentos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, O. C. et al. **Estimation of nighttime surface fluxes from vertical profiles of scalars at an Amazon pasture site.** *Global Change Biology*, v.10, p.886-894, 2004.

BRASIL. **Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro, 92 p, 1992

BALDOCCHI, D. **Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future.** *Global Change Biology*, 2003.

BETTS, R. A.; MALHI, Y.; ROBERTS, J. T. **Ecosystem and social sciences The future of the Amazon: new perspectives from climate.** *Philosophical Transactions of Royal Society*, 1729-1735, 2008

CLARK, D. B.; CLARK, C. A. **Abundance, growth, and mortality of very large trees in neotropical lowland rain forest.** *Forest Ecology and Management* 80:235-244.

DOLMAN, A. J. et al. **Meso-scale effects of tropical deforestation in Amazonia: preparatory LBA modeling studies.** *Annales Geophysicae*, 17, 1095-1110, 1999).

DA ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L.; MILLER, I. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L.; de FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. **Seasonality of water and heat fluxes over a tropical Forest in eastern Amazonia.** *Ecological Application*, 14 (4), S22-S32, 2004).

FISCH, G; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. **Uma Revisão Geral Sobre o Clima da Amazonia.** *Acta Amazônica* 28 (2): 101-126, 1998.

FISCH, G. **Camada limite amazônica: aspectos observacionais e modelagem.** 1996. 171 p. Tese de Doutorado-- Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil, 1996.

FEARNSIDE, P. M. **A floresta Amazônica nas mudanças globais**. Manaus: INPA, 2003. 134 p.

FITZJARRALD, David R.; MOORE K. E. **Mechanisms of nocturnal exchange between the rains forest and the atmosphere**. Journal of Geophysical Research, 95, 16839-16850, 1990.

FITZJARRALD, David R. et al. **Day-time turbulence exchange between the Amazon forest and the atmosphere**. Journal of Geophysical Research, 95, 16825-16850.

FIGUEIRA, A. M. S; MILLER, S. D.; de SOUSA, C. A. D.; MENTON, M. C.; MAIA, A. R.; da ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L.; **Effects of selective logging on tropical forest tree growth**. Journal of Geophysical Research, VOL.113,G00B05, doi:10.1029/2007JG000577, 2008.

FUPEF. **Inventário comercial da quadra de exploração nº 4 da Floresta Nacional do Tapajós**. 429p, Curitiba, 1984.

GASH J H. C. et al. **An overview of ABRACOS**. In: **Amazonian Deforestation and Climate** (eds Gash J H. C.; Nobre, Carlos A., Roberts, J M. Victoria R L), pp. 1-14. J. M. WILEY e SONS, New Yourk, NY, 1996)

GRECO, S.; BALDOCCHI, D. D. **Seasonal variations of CO<sub>2</sub> and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest**. Global Change Biology, v. 2, p. 183-198, 1996.

GOULDEN, M. et al. **Measurements of carbon storage by long term eddy correlation: Methods and a critical evaluation of accuracy**. Global Change Biology, v.2, p.169-182, 1996.

GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; da ROCHA, H. R.; MENTON, M. C.; de FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. de SOUSA, C. A. D. **Diel and seasonal patterns of tropical Forest CO<sub>2</sub> exchange**. Ecological Application, 14(4), S42-S54, doi:10.1890/02-6008, 2004.

GALVÃO, J. A.C.; FISCH, G.. **Balanco de energia em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia** (Ji- Paraná, RO). Revista Brasileira de Meteorologia, v. 15, n. 2, p. 25-37, 2000.

HARRIS, R. C. et al. **The Amazon boundary layer experiment: wet season 1987**. Journal of Geophysical Research, v.95, p. 16721- 17736, 1990.

HARRIS, R. C. et al. **The Amazon Boundary Layer Experiment (ABBLE 2A): dry season of 1985**. Journal of Geophysical Research, 95, 1351-1360, 1990.

HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. 411 p. New York: Academic Press, 1994.

HUTYRA, L.; MUNGER, J. W.; SALESKA, S. R.; GOTTLIEB, E.; DAUBE, B.; DUM A. L.; AMARAL D. F.; DE CAMARGO, P. B.; WOFSY, S. C. **Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest**. Journal of Geophysical Research, vol. 112, 2007.

HENRIQUES, L. M. P.; WUNDERLE JR, J. M.; OREN, D. C.; WILLIG, M. R. **Efeitos da Exploração Madeireira de Baixo Impacto sobre uma Comunidade de Aves de Sub-bosque na Floresta Nacional do Tapajós, Pará, Brasil**. Acta Amazonica, 2008.

LEITÃO, M. M.V.B.R. **Balço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada**. 1989. 111p. Dissertação de Mestrado, Campina Grande: DCA/CCT/UFPB, 1989.

LEAN, J.; ROWNTREE, P. R. **A GCM simulation of the impact of Amazonian deforestation on climate using an improved canopy representation**. Quarterly Journal of Royal Meteorology Society, 119, 509-530.

LOPES, A. de M.; CORREA, J. R. V. **Maravilha: Cultivar de Arroz de Sequeiro Recomendada para a Região Oeste do Estado do Pará**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Embrapa Amazônia Oriental. 2002

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T. R.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. **Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon**. Science 319, 169–172, 2008.

MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A.; SCOTT, S. **Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest**. Journal of Geophysical Research, v 103, 1998.

MOORE, C. J., FISCH, G. **Estimating heat storage terms in Amazonian tropical forest**. Agricultural and Forest Meteorology, v. 1-3, n. 38, p. 147-69, 1986.

MCMILLEN, R. **An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain**. Boundary Layer Meteorology, v. 43, p. 231-245, 1988.

MEIRELLES, M. L.; FARIAS, S. E. M; FRANCO, A. C. **Balço de Energia de uma Pastagem Cultivada no Cerrado**. Planatina, DF: Embrapa Cerrados, 2003.

MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; MENTON, M. C.; da ROCHA, H. R.; de FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. de SOUSA, C. A. D. **Biometric and micrometeorological measurements of tropical Forest carbon balance**. Ecological Application, 14(4), S114-S126, doi: 10.1890/02-6005, 2004.

MICHILES, A. A. dos S. AND GIELOW, R. **Above-ground thermal energy storage rates, trunk heat fluxes and surface energy balance in a central Amazonian rainforest**. Agricultural and Forest Meteorology, 148 (2008), 917-930, 2008.

MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; HUTYRA, L. R.; KELLER, M.; SALESKA, S. R.; WOFSY, S. C.; FIGUEIRA, A. M. S.; DA ROCHA, H.; AND de CAMARGO, P.B.; **Reduced impact logging minimally alters tropical rainforest carbon and energy exchange**. PNAS, 2011.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. Journal of Climate, 4, 957-988, 1991.

NOBRE, C. A.; Gash, J.H.C.; Roberts, J.M.; Victoria, R.L. **Conclusões do projeto ABRACOS. In: Amazonian deforestation and climate**. Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M., Victoria, R.L. (eds.). 611 p. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1996.

OLIVEIRA, P. J. **Estudo do vento e da turbulência na camada limite atmosférica em áreas de floresta e pastagem na Amazônia**. Dissertação de mestrado em Meteorologia. São José dos Campos: INPE, 1999.

OLIVEIRA, M. B. L. et al.. **Fluxos turbulentos de energia sobre o pantanal sul mato-grossense**. Revista Brasileira de Meteorologia. v.21, n.3b, 159-165, 2006.

PAROTTA, J.A.; FRANCIS, J. K.; ALMEIDA, R. R. **Trees of Tapajós: a photographic Field guide. General technical report IITF-1**. United States Department of Agriculture, Rio Piedras, Puerto Rico, 1995.

PEZZOPANE, J. R. M; PEDRO JÚNIOR, M. J. **Balço de energia em vinhedo de 'niagara rosada'**. Bragantia, Campinas, v.62, n.1, p.155-161, 2003.

ROTTY, R. M e MITCHELL, J. M. Jr. **Man's energy and the world's climate**. Paper to 67<sup>th</sup> Annual Meeting Amer. Instit. Chem. Engineers, Washington, D. C, 1974.

REICHARDT, K. **Dinâmica da material e da energia em ecossistemas**. 2d Piracicaba: ESALQ, p 513, 1996.

SAKAI, R. K.; et al. **Land-use change effects on local energy, water and carbon balances in an Amazonian agricultural field**. *Global Change Biology*, v.10, 895-907, 2004.

SILVA, L. D. B. da. **Evapotranspiração do capim Tazânia (*Panicum maximum* Jacq) e grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. Tese de doutorado em agronomia. Piracicaba, 2003. p 93.

STULL, R. B. **Meteorology for scientist and engineers**. Second edition. Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 2000, 666 pp.

SHUTTLEWORTH, J. W.; GASH, J. H. C.; LLOYD, C. R. **Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 110, p. 1143-1162, 1984.

SILVER, W.L. et al. Effects of soil texture on below-ground carbon and nutrient storage in a lowland and Amazonian forest ecosystem. *Ecosystems* 3: 193-209, 2000.

SHUTTLEWORTH, Jim W. et al. **Post deforestation Amazonian climate: Anglo-Brazilian research to improve prediction**. *Journal of Hydrology*, 129, 71-85, 1991.

SALESKA, S. R.; MILLER, S. D.; MATROS, D. M.; GOULDEN, M. L.; WOFSEY, S. C.; DA ROCHA, H. R.; DE CAMARGO, P. B.; CRILL, P.; DAUBE, B.; DE FREITAS, H. C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; MUNGER, J. W.; PYLE, E. H.; RICE, A. H.; SILVA H. **Carbon in Amazon Forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses**. *SCIENCE*, vol 302, 2003.

WEBB, E.; PEARMAN, G. LEUNING, R. **Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 106, p. 85-100, 1980.

WOFSEY, S. C. et al. **Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest**. *Science*, v. 260, p. 1314-1317, 1993.