

# ARMAZENAMENTO E BALANÇO DE ENERGIA EM SUPERFÍCIE PARA UMA ÁREA DE FLORESTA NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

*Alessandro Augusto dos Santos Michiles<sup>1</sup>, Ralf Gielow<sup>1</sup>*

**RESUMO** – Computaram-se os componentes da taxa de armazenamento de energia (TAE) em uma área de floresta de terra firme no Sudoeste da Amazônia (Reserva Biológica do Jaru - 10°45' S; 62°22' O), para um conjunto de dias típicos durante a transição entre as estações seca e chuvosa de 2002, e determinou-se sua relevância para o balanço de energia em superfície (BES).

Instrumentaram-se com termopares os troncos de três espécies características da floresta, em duas ou três alturas e diversas profundidades radiais. Obtiveram-se a temperatura e a umidade relativa do ar, fluxos de calores latente e sensível, saldo de radiação, precipitação pluviométrica e fluxo de calor no solo numa torre micrometeorológica instalada no sítio. Entre outros resultados, as contribuições diárias para a TAE na floresta ( $S$ ), que correspondeu entre 0,5 e 9% do saldo de radiação, foram de  $42 \pm 9\%$  devidas ao ar,  $30 \pm 7\%$  aos troncos e  $28 \pm 2\%$  aos demais componentes da biomassa. A inclusão de  $S$  nos cálculos do BES, melhorou seu fechamento, principalmente durante o período diurno e, especialmente, nas horas da manhã. Finalmente, para os dias com saldo diário de  $S$  positivo, ocorreu um melhor fechamento do BES.

**ABSTRACT** – The components of the energy storage rate (ESR) for a “Terra Firme” forest site in SW Amazon (Jaru Biological Reserve - 10°45' S; 62°22' W) were obtained for a set of typical days during the dry to wet transition season of 2002, and their relevance to the surface energy balance (SEB) was studied. The trunks of three characteristic species of the forest were instrumented with thermocouples at two or three heights and several radial depths to measure temperature series. Air temperature and humidity, sensible and latent heat fluxes, net radiation and rainfall, plus soil heat flux were obtained on a micrometeorological tower installed at the site. To the total daily ESR of the forest ( $S$ ), which remained between 0.5 and 9% of the net radiation, the air contributed with  $42 \pm 9\%$ , the trunks with  $30 \pm 7\%$  and the other biomass components with  $28 \pm 2\%$ . Further, the inclusion of  $S$  to compute the SEB improves the closure of this balance, mainly during the daylight period and, particularly, during the morning hours. Finally, for the days in which the daily balance of  $S$  was positive, there was a better closure of the SEB.

**Palavras-Chave:** Armazenamento de energia, balanço de energia, Floresta Amazônica.

## INTRODUÇÃO

Devido à vasta extensão de floresta densa e contínua existente na Amazônia, vários experimentos e estudos têm sido realizados com o intuito de se obterem informações mais precisas sobre as contribuições da região para as trocas de energia, de umidade e de carbono com a atmosfera, uma vez que o entendimento do balanço de energia em superfície (BES) de uma região florestada é importante para a compreensão dos processos climáticos envolvidos com os componentes da vegetação e de seus efeitos em diversas escalas espaciais e temporais. Assim, atualmente, diversos destes estudos têm-se concentrado em analisar a falta de fechamento do BES, pois as medições independentes dos seus componentes representam de 70 a 90% do saldo de radiação medido (Heusinkveld *et al.*, 2004). Desta maneira, determinados mecanismos têm sido propostos como possíveis causas do problema de fechamento do BES como, por exemplo, incertezas instrumentais e a não-inclusão de termos importantes para algumas classes de coberturas vegetais e determinadas escalas de tempo.

Neste contexto, a taxa de variação do armazenamento de energia (TAE) no volume ocupado pelos elementos da vegetação e pelo ar adjacente, em florestas da região Amazônica, pode apresentar-se como um termo importante para o BES local, em curtos períodos de tempo, principalmente durante o amanhecer e o anoitecer e em períodos nublados e chuvosos.

Os principais objetivos do presente trabalho foram determinar a TAE e verificar o seu papel no BES para uma região de floresta de terra firme da Reserva Biológica do Jaru, no Sudoeste da Amazônia, durante a transição entre as estações seca e chuvosa de 2002.

## DADOS E METODOLOGIA

Por meio de uma estação automática instalada numa torre de alumínio, de 60 m de altura, montada numa área de floresta de terra firme localizada na Reserva Biológica do Jaru (10°45' S e 62°22' O), situada ao norte de Ji-Paraná, em Rondônia, foram registrados os dados utilizados neste trabalho, ou seja, precipitação pluviométrica (em 60,3 m), temperatura e umidade relativa do ar (3, 12, 22 e 28 m), saldo de radiação  $R_n$  (54,3 m), fluxos turbulentos de calores sensível  $H$  e latente  $LE$  (62,7 m), e fluxo de calor no solo  $G$  (-1,0 cm). Estes dados foram obtidos durante a época de transição entre as estações seca e chuvosa na região e fazem parte do conjunto de dados do projeto RACCI/LBA.

Para obter as temperaturas de tronco, necessárias para o cálculo da TAE, três árvores características da floresta do sítio, das espécies *Andira legalis* (angelim coco), *Ocotea indecora* (canela) e *Hymenea courbaril* (jatobá) foram instrumentados com termopares na face Norte, nas

profundidades radiais de 0,5; 3,0 e 10,0 cm, e alturas de 1,7 e 15,0 m; adicionalmente, a segunda árvore foi instrumentada nas mesmas profundidades na altura de 21,5 m.

O fechamento do BES foi avaliado através de dois métodos (Wilson *et al.*, 2002). O primeiro deles envolve a obtenção dos coeficientes linear, angular e de correlação de regressões lineares entre os valores horários da soma dos fluxos não-radiativos ( $H + LE + S + G$ ) e do saldo de radiação ( $R_n$ ). No segundo, calcula-se a razão do balanço de energia (RBE) entre a soma cumulativa  $H + LE + S + G$  e  $R_n$ , sobre períodos específicos de tempo. Daí, define-se a RBE como:

$$R_{BE} = \frac{\sum (H + LE + S + G)}{\sum R_n} \quad (1)$$

A TAE total em uma floresta é composta pelos termos de armazenamento no ar,  $S_a$ , e na biomassa da floresta,  $S_b$ . Por sua vez,  $S_a$  divide-se em dois componentes, um relacionado às mudanças de temperatura no ar,  $S_T$ , e outro às variações de umidade específica,  $S_q$ . A TAE na biomassa,  $S_b$ , pode ser subdividida em 6 partes, ou seja, TAEs nos troncos,  $S_{tr}$ , nos ramos,  $S_r$ , nos galhos,  $S_g$ , nas folhas,  $S_f$ , na liteira,  $S_l$ , e nos componentes de pequeno porte (palmáceas e cipós),  $S_o$ . Para o cálculo da TAE total na floresta do sítio estudado, a interface solo-vegetação-atmosfera foi dividida em quatro camadas de espessuras diferentes, duas com 8 m e duas com 6 m. Assim, considerando  $l$  ( $= 4$ ) camadas horizontais de alturas variáveis  $\Delta z_i$ , as TAEs no ar,  $S_T$  e  $S_q$ , para um intervalo de tempo  $\Delta t$ , escritas em diferenças finitas, são expressas, respectivamente, como:

$$S_T = \frac{\rho_a c_p (1 + 0,84\bar{q})}{\Delta t} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n \Delta \bar{T}_{ik} \Delta z_i \quad \text{e} \quad S_q = \frac{\rho_a L}{\Delta t} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n \Delta \bar{q}_{ik} \Delta z_i \quad (2 \text{ a, b})$$

nas quais  $\bar{T}$  representa a temperatura média e  $\bar{q}$  a umidade específica média do ar aferidas em cada camada  $i$ , para um dado instante  $k$  ( $= 1, 2, \dots, n = 24$  – horas). O cálculo da TAE nos troncos, a partir do fluxo superficial de calor nestes,  $S_{tr}(F)$ , é feito dividindo-os, para cada camada  $i$  ( $= 1, 2$ ) de altura  $\Delta z_i$  ( $= 6$  m), em  $m$  ( $= 3$ ) anéis concêntricos de largura variável, utilizando as equações:

$$F_{ry} = \frac{\pi \rho_{tr} c_{try}}{\Delta t} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (\Delta \bar{T}_{tr})_{ijk} (r_j^2 - r_{j-1}^2)_i \Delta z_i \vartheta_i, \quad S_{tr}(F) = \frac{\sum_{y=0}^s F_{ry}}{\sum_{y=0}^s A_{TRy}} \quad \text{e} \quad A_{TRy} = \frac{A_{By}}{A_B} A_T \quad (3 \text{ a, b, c})$$

sendo  $F_{ry}$  o fluxo superficial total de calor em um tronco representativo de uma dada espécie  $y$  dominante do sítio,  $\rho_{tr}$  a massa específica e  $c_{try}$  o calor específico deste tronco,  $\bar{T}_{tr}$  representa a temperatura média de tronco aferida em cada anel cilíndrico,  $(r_j - r_{j-1})_i$  a largura do anel cilíndrico;  $A_{TRy}$ ,  $A_{By}$ ,  $A_B$  e  $A_T$  são, respectivamente, as áreas topográfica relativa ocupada pelo tronco representativo, basal deste tronco, basal total ( $= 89,6 \text{ m}^2$ ) do conjunto de (2484) árvores e topográfica ocupada pela floresta do sítio ( $= 2,5 \text{ ha}$ ), obtidas por meio de levantamento florestal

realizado por Saatchi e Alvalá (2006).  $v_i$  é o fator de forma do tronco (Blanken *et al.*, 1997), para cada camada  $i$ , que relaciona o volume de tronco, considerado-o com um formato de tronco de cone, com o volume cilíndrico utilizado para a obtenção do fluxo superficial de calor,  $F_{ry}$ .

As TAEs nos ramos ( $r$ ), galhos ( $g$ ), folhas ( $f$ ), liteira ( $l$ ) e outros ( $o$ ) são obtidos através de:

$$S_{f,g,o} = m_{f,g,o} c_{f,g,f} \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_i \quad \text{e} \quad S_{r,l} = m_{r,l} c_{r,g} \left. \frac{\partial T_{tr}}{\partial t} \right|_{i,R} \quad (4 \text{ a, b})$$

nas quais  $m$  e  $c$  são, respectivamente, a massa por unidade de área topográfica e o calor específico estimados para cada um dos componentes da floresta do sítio, e  $\partial T/\partial t$  e  $\partial T_{tr}/\partial t$  são, respectivamente, as séries de temperatura do ar, utilizadas para galhos (22 m), folhas (28 m) e outros (3 m) e da superfície tronco da árvore da espécie *Ocotea indecora* (canela), utilizadas para os ramos (21,5 m).

## RESULTADOS

Os cálculos dos termos que compõem a TAE total, e do BES para área de floresta estudada, foram realizados para um conjunto de 6 dias típicos selecionados, três sem e três com a ocorrência de precipitação pluviométrica. Estes dias foram: 13/10 (DJ 286), 05 (DJ 309), 06 (DJ 310), 07 (DJ 311), 08 (DJ 312) e 09/11/02 (DJ 313).

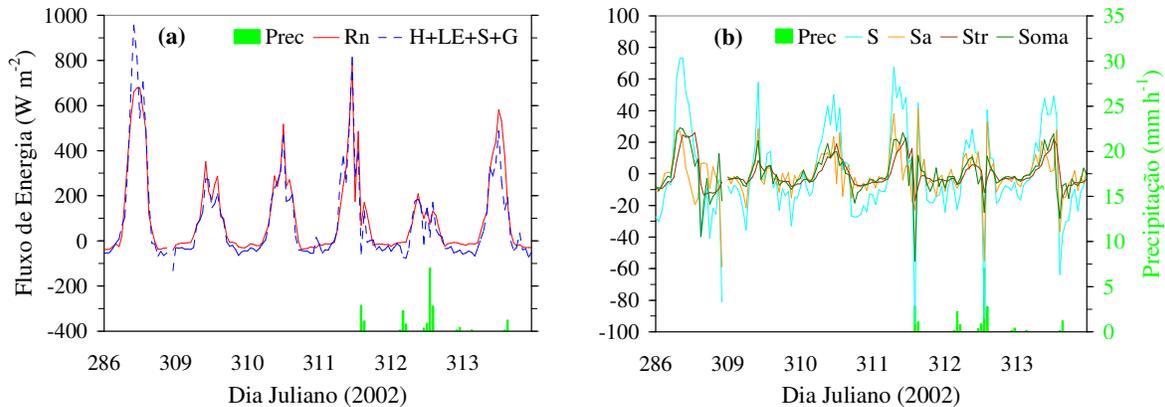


Figura 1 – Variação horária (a) do saldo de radiação, do somatório dos fluxos (não-radiativos) de energia e da precipitação; (b) das TAEs total,  $S$ , no ar,  $S_a$ , nos troncos,  $S_{tr}$ , da soma dos componentes  $S_r$ ,  $S_g$ ,  $S_f$ ,  $S_l$  e  $S_o$  ( $S_{oma}$ ) e da precipitação na floresta da Rebio Jaru durante os dias selecionados (ver texto).

Quando a variação horária é considerada (Figura 1a), observa-se que em quase todos os horários há um resíduo da diferença entre  $R_n$  e o somatório  $H + LE + S + G$ . Em média, para os dias selecionados, o valor do resíduo é  $20,2 \pm 60,8 \text{ W m}^{-2}$ . Sem a inclusão de  $S$  neste cálculo, o valor do resíduo passa a ser  $20,4 \pm 61,7 \text{ W m}^{-2}$ .

O perfil horário de  $S$  (Figura 1b) apresenta valores usualmente entre 20 e 30  $\text{W m}^{-2}$ , mas com máximos de até 80  $\text{W m}^{-2}$ ; outrossim, durante eventos de chuva,  $S$  apresenta mínimos de até  $-100 \text{ W m}^{-2}$ . Em totais diários (não mostrados), observaram-se valores de  $S$  entre 0,5 e 9% de  $R_n$ , sendo estes dependentes das condições do tempo ao longo do dia. As contribuições médias diárias, durante os dias selecionados, de cada um dos termos,  $S_a$ ,  $S_{lr}$  e  $S_{oma}$ , para  $S$ , foram, respectivamente,  $42 \pm 9\%$ ,  $30 \pm 7\%$  e  $28 \pm 2\%$ .

Através de regressões lineares entre o somatório dos fluxos (não-radiativos) de energia e o saldo de radiação, verificou-se que a inclusão da TAE,  $S$ , nos cálculos do BES, tanto em termos diários (Figura 2) quanto diurnos e noturnos (não apresentados), melhora ligeiramente seu fechamento, apesar da regressão noturna ainda apresentar muita dispersão ( $r^2 = 0,02$ , não incluindo  $S$ , e  $r^2 = 0,13$ , incluindo-o).

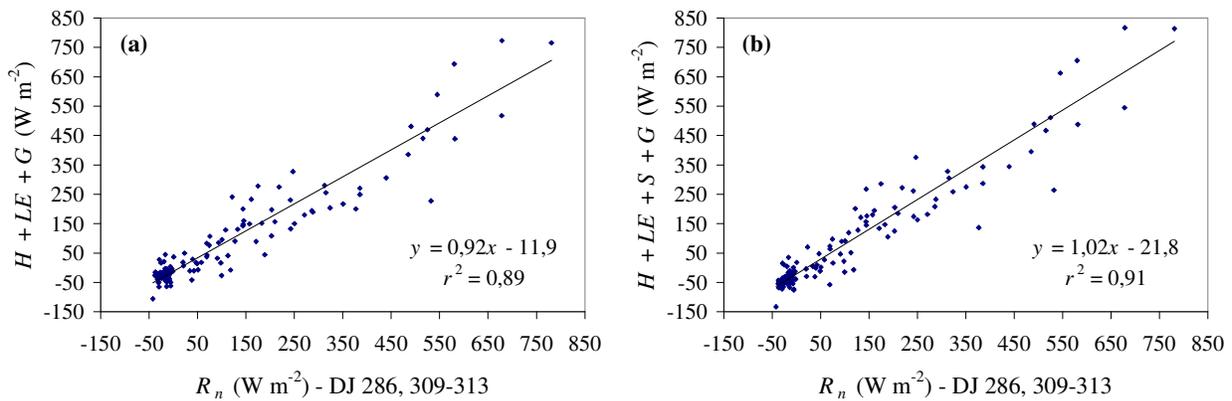


Figura 2 – Regressões entre (a) o somatório dos fluxos,  $H + LE + G$ , e o saldo de radiação,  $R_n$ ; (b) o somatório dos fluxos,  $H + LE + S + G$ , e o saldo de radiação,  $R_n$ , para o ciclo diário (24 horas) dos mesmos dias apresentados na Figura 1.

Tabela 1 – Coeficientes linear, angular e de correlação das regressões lineares entre o somatório dos fluxos (não-radiativos) de energia,  $H + LE + S + G$ , e o saldo de radiação,  $R_n$ , e razão do balanço de energia ( $R_{BE}$ ), para os mesmos dias da Figura 1.

DJ	Coef. Linear	Coef. Angular	$r^2$	$R_{BE}$
286	-15,8	1,16	0,94	1,05
309	-18,8	0,89	0,93	0,63
310	-15,4	0,93	0,96	0,76
311	-13,9	1,02	0,92	0,91
312	-29,0	1,10	0,82	0,46
313	-20,0	0,76	0,89	0,59
286, 309-313	-21,8	1,02	0,91	0,80

Adicionalmente, por meio do cálculo da RBE, confirmou-se que a consideração de  $S$  nos cálculos do BES, melhora o seu fechamento, principalmente durante o período diurno e, em especial, durante as horas da manhã, quando geralmente  $S$  atinge os seus máximos horários. Verificou-se também que, em dias em que o saldo diário de  $S$  é positivo, ocorre um melhor fechamento no BES como, por exemplo, no DJ 311 (Tabela 1). Porém, quando o saldo diário é negativo, a tendência é de a inclusão de  $S$  piorar o fechamento, como ocorreu no DJ 312.

## CONCLUSÕES

Devido à ocorrência de grandes biomassas, altas temperaturas e umidades relativas do ar em florestas de terra firme da Amazônia, a estimativa da TAE nestas é crítica para o BES, particularmente durante as primeiras horas do dia, quando  $S$  atinge seus valores máximos e pode ser uma fração significativa de  $R_n$ .

No que concerne ao fechamento do BES, observou-se, em termos horários, diurnos, noturnos e diários, uma relativa melhora quando se inclui a TAE nos cálculos, excetuando-se os dias em que o saldo diário de  $S$  apresenta valores relativamente altos e negativos.

**AGRADECIMENTOS** – A Antônio Ocimar Manzi e Celso von Randow e à equipe técnica do projeto RACCI pela montagem do experimento e obtenção dos dados nas árvores, e a Sassan Saatchi e Regina Célia dos Santos Alvalá pela cessão do levantamento da biomassa da floresta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blanken, P.D.; Black, T. A.; Yang, P. C.; Neumann, H. H.; Nesic, Z.; Staebler, R.; den Hartog, G.; Novak, M. D.; Lee, X. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: partitioning overstory and understory components. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D24, p. 28915-28927, Dec. 1997.
- Heusinkveld, B. G.; Jacobs, A. F. G.; Holtslag, A. A. M; Berkowicz, S. M. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 21-37, 2004.
- Saatchi, S.; Alvalá, R. C. S. **Inventário florestal completo realizado na floresta de terra firme da Reserva Biológica do Jaru, em 2002**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006). Comunicação pessoal.
- Wilson, K.; Goldstein, A.; Falge, E.; Aubinet, M.; Baldocchi, D.; Berbigier, P.; Bernhofer, C.; Ceulemans, R.; Dolman, H.; Field, C.; Grelle, A.; Ibrom, A.; Law, B. E.; Kowalski, A.; Meyers, T.; Moncrieff, J.; Monson, R.; Oechel, W.; Tenhunen, J.; Valentini, R.; Verma, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 223-243, 2002.