

CÁLCULO DAS TAXAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM FLORESTAS DE TERRA FIRME NA AMAZÔNIA

ALESSANDRO AUGUSTO DOS SANTOS MICHILES¹, RALF GIELOW²

¹ Físico, Doutorando em Meteorologia, CPTEC, INPE, São José dos Campos - SP, Fone: (12) 3945-6184, michiles@cptec.inpe.br.

² Engenheiro Químico, Pesquisador Titular, CPTEC, INPE, São José dos Campos - SP.

Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007 – Aracaju – SE

RESUMO: Dois métodos para o cálculo dos termos da taxa de armazenamento de energia em florestas de terra firme são apresentados. Como entrada, são utilizados dados de temperatura e umidade específica do ar e de temperatura de troncos. O mais completo destes métodos depende de medidas em diversas alturas dentro e acima da floresta e em várias profundidades de um ou mais troncos, enquanto que o método simplificado, baseado numa solução analítica da equação de condução do calor, requer unicamente de medidas em uma altura da floresta e uma profundidade de um tronco. Para testes e comparações entre os métodos, foram utilizados dados observacionais coletados durante a transição entre as estações seca e chuvosa de 2002 na Reserva Biológica do Jaru, Rondônia. Verificou-se que os resultados obtidos pelos dois métodos estão bem correlacionados e equivalentes entre si, de forma que, para fins de modelagem numérica, pode-se utilizar o método simplificado que, além de depender de um menor volume de dados, gera resultados sem desvios significativos dos obtidos através do método mais completo.

PALAVRAS-CHAVE: armazenamento de energia, balanço de energia, Floresta Amazônica.

CALCULATION OF THE ENERGY STORAGE RATES IN AMAZON “TERRA FIRME” FORESTS

ABSTRACT: Two methods for calculating the components of the energy storage rates in “terra firme” forests are presented. They depend on the temperature and specific humidity of air and the temperature of trunks as input data. The more complete method depends on measures in several heights above and below the canopy, plus measures in some depths of one or more trunks. The simplified one, which is based on an analytical solution of the equation of conduction of heat, needs only measures at one height of the forest and at one depth of one trunk. Observational data obtained during the transitional period between the dry and rainy seasons of 2002 at the Biological Reserve of Jaru, Rondonia, Brazil, were used to test and compare the methods. The results show that the methods are well-correlated and equivalent. So, for numerical modeling, as the simplified method depends on less data to be effected, it may be used, thus obtaining results that do not deviate significantly from the ones obtained through the more complete method.

KEYWORDS: energy storage, energy balance, Amazon Forest.

INTRODUÇÃO: O conhecimento dos fluxos de energia (dados em $W m^{-2}$) e de suas características sobre florestas, é fundamental para qualquer modelo que simule a interação solo-vegetação-atmosfera. Dentre estes fluxos, a taxa de variação do armazenamento de

energia (TAE) no volume ocupado pelos elementos da vegetação e pelo ar adjacente em florestas, pode apresentar-se como um termo importante para o balanço de energia em superfície (BES) local, especialmente durante curtos períodos de tempo (menores que um dia). Desta forma, uma vez que condições de contorno e parametrizações mais realísticas dos vários processos em superfície, como os que acontecem entre vegetação e atmosfera, são componentes essenciais em modelos numéricos que simulam o comportamento atmosférico, a inclusão da TAE em florestas é necessária para aprimorar estes modelos, principalmente para simular fenômenos com respostas em curta escala de tempo. Os principais objetivos do presente trabalho foram determinar a TAE em florestas de terra firme, por meio de duas metodologias, uma simplificada e outra mais completa, e verificar a correspondência entre seus resultados, utilizando dados coletados na Reserva Biológica do Jarú (Rebio Jarú).

MATERIAL E MÉTODOS : O conjunto de dados utilizados neste trabalho, isto é, temperatura (T) e umidade relativa do ar (q), saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G) e fluxos turbulentos de calores sensível (H) e latente (LE), foram coletados, em 2002, por meio de instrumentos montados numa torre micrometeorológica erguida numa área de floresta de terra firme da Reserva Biológica do Jarú ($10^{\circ}45' S$ e $62^{\circ}22' O$), em Rondônia, durante a época de transição entre as estações seca e chuvosa na região. Eles fazem parte do conjunto de dados do projeto RACCI/LBA. Para obter as temperaturas de tronco (T_i), três árvores características da floresta, das espécies *Andira legalis* (angelim coco), *Ocotea indecora* (canela) e *Hymenea courbaril* (jatobá) foram instrumentadas 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. Conforme detalhado em Michiles (2005), o cálculo da TAE total numa floresta é realizado dividindo-a em três termos principais, isto é, TAE no ar (S_a), nos troncos (S_t) e nos outros componentes da biomassa (S_b). Para o cálculo da TAE utilizando o método de integração completa (S_{com}), a interface solo-vegetação-atmosfera foi dividida em quatro camadas, duas com 8 m e duas com 6 m. Assim, considerando $I (= 4)$ camadas horizontais de alturas variáveis $\Delta Z_i (= 8$ ou 6 m), para um intervalo de tempo $\Delta t (= 3600$ s) e um dado instante $k (= 1, 2, \dots, n = 24 - HL)$, a TAE no ar, $S_{a(c)}$, é expressa como:

$$S_{a(c)} = \frac{\rho_a}{\Delta t} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^n [c_p (1 + 0,84\bar{q}) \Delta \bar{T}_{ik} + L \Delta \bar{q}_{ik}] \Delta Z_i \quad (1)$$

sendo ρ_a e c_p , respectivamente, a massa específica e o calor específico à pressão constante do ar, e L o calor latente de vaporização da água. O cálculo da TAE nos troncos, $S_{t(c)}$, é feito dividindo-os, para cada camada $i (= 1, 2)$ de altura $\Delta Z_i (= 8$ m), em m anéis cilíndricos concêntricos de largura variável $(r_j - r_{j-1})_i$, e utilizando as equações:

$$F_{ry} = \frac{\pi \rho_{ty} c_{ty}}{\Delta t} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (\Delta \bar{T}_t)_{ijk} (r_j^2 - r_{j-1}^2)_i \Delta Z_i \mathcal{G}_i, \quad S_{t(c)} = \frac{\sum_{y=0}^s F_{ry}}{\sum_{y=0}^s A_{Ry}} \quad \text{e} \quad A_{Ry} = \frac{A_{By}}{A_B} A_T \quad (2 \text{ a, b, c})$$

nas quais F_{ry} é o fluxo superficial de calor em um tronco representativo de uma dada espécie y , ρ_{ty} é a massa específica e c_{ty} é o calor específico deste tronco; A_{Ry} , A_{By} , A_B e A_T são, respectivamente, as áreas (i) relativa ocupada pelo tronco representativo, (ii) basal deste tronco, (iii) basal total do conjunto das árvores da floresta, e (iv) total ocupada pela floresta. \mathcal{G}_i é um fator de forma, que relaciona o volume de tronco, considerado-o como um tronco de cone, com o volume cilíndrico utilizado para a obtenção do fluxo superficial de calor, F_{ry} . A

TAE nos outros componentes da biomassa, $S_{b(c)}$, é dividida em ramos (r), galhos (g), folhas (f), liteira (l) e palmáceas (p), e obtida através de:

$$S_{b(c)} = m_r c_r \left. \frac{\Delta \bar{T}_t}{\Delta t} \right|_{3,R} + m_g c_g \left. \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} \right|_3 + m_f c_f \left. \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} \right|_4 + m_l c_l \left. \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} \right|_{1,R} + m_p c_p \left. \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} \right|_1 \quad (3)$$

sendo m a massa por unidade de área da floresta e c o calor específico estimados para cada um dos componentes, $\Delta \bar{T}_t / \Delta t$ e $\Delta \bar{T} / \Delta t$, respectivamente, as séries de temperatura do tronco (0,5 cm) de uma árvore instrumentada na floresta (canela), utilizadas para ramos (21,5 m) e liteira (1,7 m), e do ar, utilizadas para galhos (22 m), folhas (28 m) e palmáceas (3 m).

O cálculo da TAE, através do método simplificado (S_{sim}), foi realizado considerando uma única camada de ar de altura ΔZ ($= 28$ m), e que as variações horárias de temperatura e umidade específica do ar são representadas por uma medida pontual num único nível da camada (12 m). Assim, a TAE no ar, $S_{a(s)}$, é dada por:

$$S_{a(s)} = \rho_a (c_p \Delta \bar{T} + Lq) \frac{\Delta Z}{\Delta t} \quad (4)$$

O cálculo da TAE nos troncos foi realizado a partir das temperaturas medidas (na altura de 15 m e profundidade de 3,0 cm) num tronco instrumentado (canela), e por meio do uso de uma solução analítica da equação de condução do calor, apresentada por Meesters e Vugts (1996):

$$S_{t(s)} = m_t c_t \lambda(\varphi, \varphi_R) \sec \psi(\varphi, \varphi_R) \frac{\Delta \bar{T}_t}{\Delta t} \quad (5)$$

em que m_t e c_t são, respectivamente, a massa por unidade de área da floresta e o calor específico dos troncos; λ e ψ são funções relacionadas ao amortecimento e atraso de fase da onda de temperatura que penetra o tronco radialmente; φ e φ_R estão relacionadas à profundidade de penetração desta onda de temperatura, em função da difusividade térmica do tronco. A TAE nos demais componentes da biomassa é obtida utilizando:

$$S_{bio} = [m_r c_r + (m_g + m_l) c_g + (m_f + m_o) c_f] \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Para os cálculos dos termos que compõem a TAE total (S_a , S_t e S_b) realizados através dos métodos apresentados e a comparação entre seus resultados, foi selecionado um conjunto de dados coletados em quatro dias típicos do período de transição entre as estações seca e chuvosa na floresta da Rebio Jaru. Assim, foram selecionados os dias 05, 06, 07 e 08 de novembro de 2002, sendo que, destes, os dois últimos tiveram a ocorrência de precipitação pluviométrica. Considerando a variação horária (Figura 1), observa-se uma excelente correspondência entre os perfis de S_{com} e S_{sim} com uma pequena diferença em alguns horários. Em média, para os dias selecionados, o valor absoluto da diferença entre S_{com} e S_{sim} é $4,1 \pm 5,0 \text{ W m}^{-2}$, com um mínimo de 0,0 e máximo de $34,9 \text{ W m}^{-2}$. Além disso, em termos gerais, verifica-se que a TAE total é geralmente negativa antes do nascer-do-sol e após as 16 HL, e alcança os máximos durante o início da manhã com valores que podem exceder 80 W m^{-2} ; outrossim, durante eventos de chuva, S apresenta mínimos em torno de -100 W m^{-2} . A regressão linear entre os valores horários de S_{sim} e S_{com} , obtidos para os quatro dias selecionados (Figura 2), mostrou uma correlação muito boa entre os dois métodos, com coeficientes linear, angular e de correlação iguais a 0,04, 1,14 e 0,970, respectivamente, podendo ser considerados equivalentes; a correlação perfeita seria dada por 0, 1 e 1, respectivamente. Quando se comparam os valores diários dos termos da TAE calculados pelo método simplificado com aqueles obtidos através do método mais completo (Tabela 1), observa-se que existe uma boa correspondência entre estes, a qual é melhor entre $S_{a(s)}$ e $S_{a(c)}$,

devido ao menor desvio padrão destes. Em geral, os termos de S_{sim} tendem a superestimar os de S_{com} , com $S_{t(s)}$ fazendo-o em maiores proporções. Em médias diárias (não mostradas), cada termo (S_a , S_t e S_b) contribui, aproximadamente, com um terço para S .

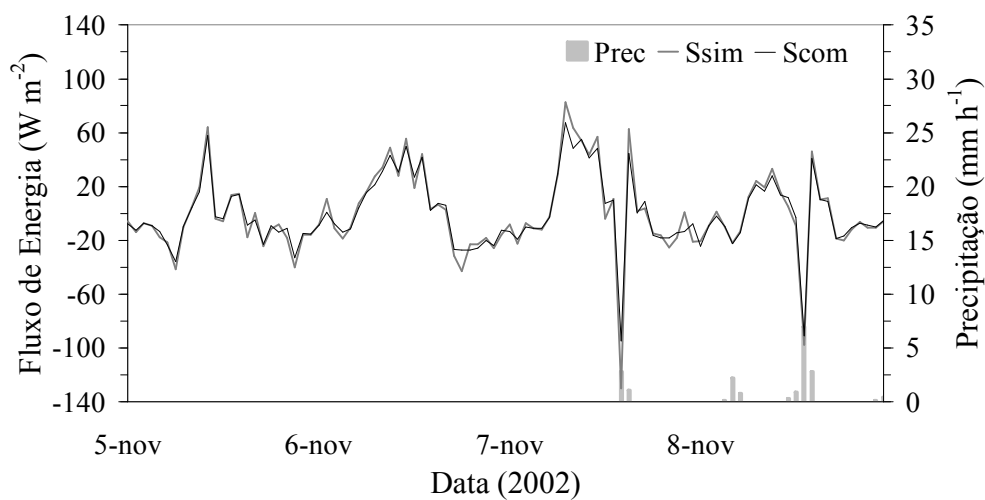


Figura 1 – Variação horária da TAE total obtida através dos métodos (i) simplificado, S_{sim} , e (ii) completo, S_{com} , e da precipitação pluviométrica na floresta da Rebio Jaru durante os dias selecionados (ver texto).

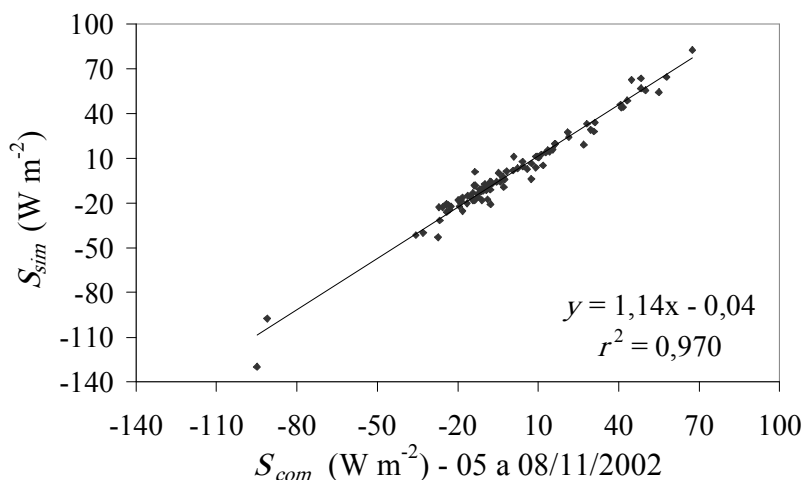


Figura 2 – Regressão linear entre os valores horários da TAE calculada pelo método simplificado, S_{sim} , e pela integração completa, S_{com} , durante os dias selecionados.

Tabela 1 – Relação entre os valores diários dos termos S_a , S_t e S_b , calculados através dos métodos simplificado [sub-índice (s)], e completo [sub-índice (c)], com Média e Desvio Padrão (DP), para os dias selecionados.

Data	$S_{a(s)} / S_{a(c)}$	$S_{t(s)} / S_{t(c)}$	$S_{b(s)} / S_{b(c)}$	S_{sim} / S_{com}
05/11/2002	1,00	1,27	1,12	1,12
06/11/2002	0,88	0,94	1,19	0,98
07/11/2002	0,99	1,22	1,02	1,06
08/11/2002	0,96	1,21	0,70	0,98
Média	0,96	1,16	1,01	1,03
DP	0,05	0,15	0,22	0,07

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 nos cálculos do BES melhora ligeiramente seu fechamento, tanto utilizando o método simplificado (Figura 3) quanto a integração completa (não apresentada; coeficientes iguais a -20,12, 0,99 e 0,921). Não incluindo S nestes cálculos, obtiveram-se os valores -10,09, 0,88 e 0,910 para os coeficientes.

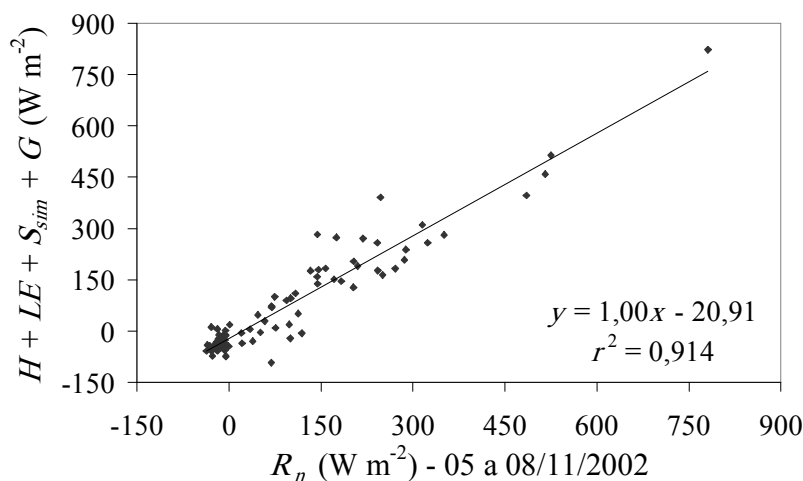


Figura 3 – Regressão linear entre os valores horários do somatório dos fluxos de energia $H + LE + S_{sim} + G$, e o saldo de radiação, R_n , durante os dias selecionados.

CONCLUSÕES: Em florestas de terra firme, como a da Rebio Jaru, com a finalidade de modelar numericamente os processos de troca entre vegetação e atmosfera, pode-se utilizar, para o cálculo da TAE, o método simplificado apresentado neste trabalho, não ocorrendo desvios significativos dos resultados obtidos através do método mais completo. No que concerne ao fechamento do balanço de energia, observou-se uma relativa melhora quando se inclui a TAE nos cálculos, possivelmente devido à ocorrência de grandes biomassas, altas temperaturas e umidades relativas do ar em florestas de terra firme da Amazônia.

AGRADECIMENTOS: A Antônio Ocimar Manzi e Celso von Randow e à equipe técnica do projeto RACCI pela montagem do experimento e coleta dos dados nas árvores, e a Sassan Saatchi e Regina C. dos S. Alvalá pela cessão dos dados de levantamento florestal da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Meesters, A. G. C. A.; Vugts, H. F. Calculation of heat storage in stems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, n. 3-4, p. 181-202, Feb. 1996.

Michiles, A. A. S. **Taxas de armazenamento de energia e fluxos de calor nos troncos em floresta de terra firme na Amazônia central**. 2004-02-27. 215 p. (INPE-12323-TDI/992). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. <http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2004/04.29.09.28/doc/paginadeacesso.html>