

CARACTERÍSTICAS DO BALANÇO DE ENERGIA NO MANGUEZAL DE BRAGANÇA-PA E ALTERAÇÕES NO FLUXO DE CALOR NO SOLO EM FUNÇÃO DO DESMATAMENTO

João Batista Miranda RIBEIRO¹

Edson José Paulino da ROCHA¹

Marco Antonio Vieira FERREIRA¹

Paulo Jorge de OLIVEIRA²

Arthur MATTOS³

Resumo

O manguezal de Bragança-PA, que possui uma área de 120 km² apresenta algumas clareiras devido a desmatamentos. As condições micrometeorológicas no manguezal de Bragança-PA foram observadas durante o ano de 1997, cuja radiação solar global foi elevada com um pico médio mensal de 938 W m⁻². Os registros mostraram uma grande atenuação da radiação fotossinteticamente ativa através do dossel do mangue. As medidas do saldo de radiação no manguezal representaram, em média, 78% da radiação solar. As estimativas dos fluxos de calor latente e sensível, representaram 69% e 24% do saldo de radiação, respectivamente. As altas taxas de aquecimento do solo exposto à incidência direta da radiação solar na área desmatada, submeteu o solo a valores de temperatura de 38,3°C em comparação com 27,0°C no manguezal. Este efeito foi notado nas variações do fluxo de calor no solo, cujos picos médios horários atingiram 73,1 W m⁻² na área desmatada e 9,4 W m⁻² no manguezal, com retardo de duas horas.

Palavras-chave: Micrometeorologia. Radiação solar. Balanço de energia. Fluxo de calor no solo.

Abstract

Energy balance characteristics in a mangrove at Bragança-PA and soil heat flux modifications after deforestation

The mangrove ecosystem of Bragança-PA which has an area of 120 km² presents some deforested areas. An micrometeorological experiment was developed to determine the micrometeorological conditions in the mangrove during 1997, where it was observed that the global solar radiation was high with a peak of 938 W m⁻². The results have shown a large interception of photosynthetic active radiation through the canopy. The net radiation in the mangrove area represents 78% of the incident solar radiation. Latent and sensible heat fluxes were 69% and 24% of net radiation, respectively. It was found that in the deforested area soil temperatures reached values of 38,3°C in relation to a value of 27,0°C in the mangrove, due to the high rates of soil heating which remained exposed to the incident solar radiation. This effect was also observed in the variations of soil heat flux, which reached peaks of 73,1 W m⁻² at deforested area and 9,4 W m⁻² at mangrove, showing a delay of two hours.

Key words: Micrometeorology. Solar Radiation. Energy Balance. Soil Heat Flux.

¹ Universidade Federal do Pará-Centro de Geociências- Departamento de Meteorologia - Campus Universitário do Guamá - Av. Augusto Corrêa, nº 01, Caixa Postal nº 11611 - Belém-PA, CEP 66.075-110 - E-mail: jbm@ufpa.br, eprocha@ufpa.br

² Universidade Federal Rural da Amazônia - Av. Tancredo Neves s/n - Belém-PA, CEP 66.077-720 - E-mail: pjosouza@aol.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte-LARHISA-CT - Campus Universitário - Rio Grande do Norte, CEP 59.078-970 - E-mail: armattos@ct.ufrn.br

INTRODUÇÃO

De acordo com as informações da União Internacional para a Conservação da Natureza – IUCN (1983), o Brasil apresenta a mais extensa área de manguezais do mundo, com cerca de 25.000 km², com a Indonésia em segundo lugar, ocupando 21.763 km². O manguezal do Brasil se estende desde o extremo norte, no estado do Amapá, até Santa Catarina, no Sul do Brasil. No entanto, a maior área encontra-se nos litorais do Amapá, Pará e Maranhão, com algumas ocorrências importantes nos estuários do Nordeste, especialmente na Bahia (DIEGUES, 1996).

A grande biodiversidade do manguezal, depende da estabilidade do meio físico, porém, vive sob pressão causada pela ação antrópica do desmatamento para exploração econômica da superfície, causando alterações microclimáticas, abordadas por Ribeiro (2001). Este fato tem aumentado a preocupação sobre a possível irreversibilidade do impacto ambiental local e sua influência no regime micrometeorológico. Porém, muito pouco se conhece a respeito da biodiversidade do manguezal e as respostas da vegetação às condições climáticas atuais.

É praticamente impossível organizar um modelo teórico, que represente a complexa organização dos mecanismos de interação da energia a partir da radiação solar incidente. Pode-se simular o balanço de energia, considerando a estrutura básica e a fisiologia dos elementos principais do manguezal. Devido à dificuldade de medições micrometeorológicas em função dos elevados custos para a aquisição de instrumentação adequada, torna-se necessário a representação matemática das condições micrometeorológicas no manguezal, com a finalidade de determinar os fluxos líquidos de energia entre o dossel vegetativo e a atmosfera. O efeito de absorção da radiação solar pelo substrato mantém um controle no balanço de radiação no manguezal, o qual funciona como uma espécie de regulador térmico, evitando grandes amplitudes térmicas diárias (CHAPMAN, 1977; HERZ, 1988; SILVA; HERZ, 1987; SNEDAKER, 1982).

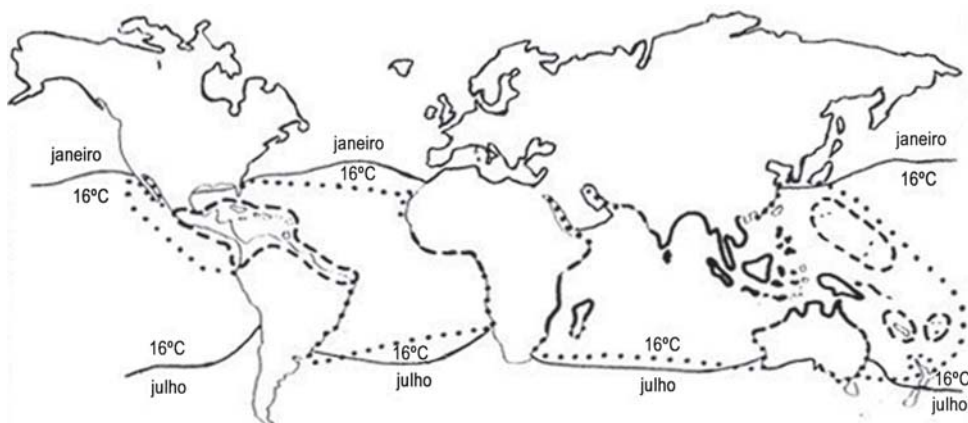
Neste trabalho utilizou-se como referência o manguezal de Bragança-PA, onde ocorre o processo de desmatamento, com a finalidade de analisar as características do balanço de radiação e energia, considerando-se as alterações no fluxo de calor no solo entre uma área de manguezal natural e outra desmatada.

MATERIAL E MÉTODOS

Sítios experimentais e instrumentação

Os manguezais cobrem mais de 100.000 km² das costas tropicais do mundo. As regiões de maior desenvolvimento dos manguezais encontram-se na faixa entre os trópicos de Câncer e de Capricórnio (23° 27'N e 23° 27'S). O desenvolvimento estrutural máximo dos manguezais tende a ocorrer próximo à Linha do Equador. Um fator limítrofe de tolerância de temperaturas no inverno, situa-se em torno de 16°C entre os meses de janeiro (hemisfério norte) e julho (hemisfério sul), conforme mostra a figura 1.

Figura 1 - Distribuição mundial dos manguezais, considerando-se para as árvores de mangue com mais de 20 espécies as linhas (¾), entre 5 e 20 espécies as linhas (—) e menos que 5 espécies as linhas (...)



Fonte: Chapman (1977).

O manguezal de Bragança fica a 150 km de distância da desembocadura sul do Rio Amazonas. Essa região entre a Costa e o Oceano Atlântico, prolonga-se em um total de 120 km², numa faixa de manguezal de até 20 km de largura. A característica fisiográfica do manguezal enquadra-se no tipo Bacia, florestas que ocorrem em áreas internas, em depressões, com canais de drenagem de água terrestre para a Costa. O sítio experimental do manguezal localiza-se entre as coordenadas 00° 52' S de latitude e 46° 39' W de longitude, a cerca de 31 km de distância de Bragança, próxima ao Furo do Chato (Figura 2). Através do levantamento das espécies realizado por Silva; Carvalho e Mello. (1997), foi observada a presença predominante de *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Laguncularia racemosa*.

No sítio experimental, o manguezal natural (Figura 3a) é do tipo exuberante, denso e alto, com altura média das árvores em torno de 20 m. Faz parte da franja interna do manguezal, de maior proximidade ao canal e troca mais freqüente das águas de inundação por efeitos de maré. As áreas desmatadas dentro do manguezal são distribuídas em clareiras adjacentes à estrada que corta o manguezal até a praia de Ajuruteua. A clareira onde foi estabelecido o sítio experimental ocupa uma área de aproximadamente 4 km², a 16 km de distância de Bragança, cujo sítio experimental situa-se entre as coordenadas 00° 56' S de latitude e 46° 42' W de longitude (Figura 3b). O solo na área desmatada é classificado como gleissolo salino, apresentando modificações estruturais de caráter quase total, devido a exposição à incidência da radiação solar direta.

Figura 2 – Localização geográfica do manguezal de Bragança-PA



Figura 3 – Vista parcial das áreas experimentais do manguezal de Bragança-PA em seu estado natural (a) e clareira (b) aberta no entorno do manguezal à beira da estrada



Para a medição das variáveis micrometeorológicas necessárias para a caracterização do microclima do manguezal, foi erguida uma torre de 25 m de altura, no topo da qual foi instalada uma estação meteorológica automática. A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi medida diretamente na estação meteorológica automática em unidades de densidade de fluxo de fótons em três níveis de altura acima da superfície do solo (25, 15 e 5 m), durante o período de 14 a 16/03/97 e de 19 a 21/03/97.

A estimativa do fluxo de calor no solo foi efetuada com base nas medidas horárias da temperatura do solo por meio de geotermômetros, nos níveis de 2, 5, 10 e 20 cm de profundidade a partir da superfície, em uma campanha experimental realizada no período de 17 a 20/06/97. Para a determinação do balanço de energia, foram selecionados os dias 17, 18 e 19/06/97, período em que não ocorreu precipitação. O índice de área foliar do dossel (IAF) e a resistência estomática foram obtidos de medições realizadas no período de 2 a 8/09/1997. O IAF dos mangues foi estimado com a utilização de um analisador de área foliar LAI-2000, em função da largura e comprimento de cada folha, cujas amostragens foram obtidas de duas árvores das espécies *Avicennia* e *Rhizophora*, dentro da área experimental, obtendo-se o valor de IAF=5. Os dados de resistência estomática máxima ($r_{smax} = 650 \text{ s m}^{-1}$) e mínima ($r_{smin} = 100 \text{ s m}^{-1}$) foram obtidos para as espécies de mangue citadas acima, utilizando-se um porômetro modelom LICOR LI-1600. Através de análises da condutibilidade térmica do solo, o valor encontrado para o manguezal foi, $\lambda = 0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. O albedo médio estimado ($\alpha = 0,14$) foi determinado através dos resultados apresentados por Herz, 1998. Na área desmatada foi instalada uma bateria de geotermômetros nas profundidades de 2, 5, 10 e 20 cm a partir da superfície, em uma campanha experimental realizada simultaneamente com o manguezal natural (período de 17 a 20/06/97).

A estação meteorológica automática e a torre micrometeorológica instalados no manguezal, com a respectiva instrumentação são apresentados na figura 4.

Figura 4 - Esquema da estação meteorológica automática (a) instalada no topo da torre micrometeorológica (b) no manguezal



Embasamento teórico

O balanço de energia considera as contribuições dos fluxos de entrada e saída de energia num volume de controle, representado pela camada de ar acima da superfície ocupada pela vegetação do manguezal, em nosso caso, a coluna de ar abaixo do nível de medições do saldo de radiação. Na presença de advecção (transporte horizontal de calor sensível pelo ar), a equação do balanço de energia pode ser expressa por:

$$R_n + A = H + LE + S + F + \Delta V \quad (1)$$

onde as fontes de energia são representadas pela soma da energia líquida disponível ou saldo de radiação R_n e a energia proveniente da advecção A ; H é o fluxo de calor sensível e LE é o fluxo de calor latente (sendo L o calor latente de evaporação e E a taxa de evaporação). S é o fluxo de calor no solo, F é a energia usada para outros processos, tais como, a energia fixada pela fotossíntese e demais processos metabólicos nas folhas e ΔV é a variação no armazenamento de energia (calor sensível e latente) na biomassa e na coluna de ar abaixo do nível de medição do saldo de radiação, sendo todos os fluxos expressos em $W \cdot m^{-2}$. Foram desprezados F , que em geral representa de 1% a 2% do saldo de radiação e ΔV , pois somente é significativo para vegetação de alto porte, como por exemplo para florestas tropicais e em períodos de transição no fornecimento de energia solar à superfície vegetada, ou seja, durante o nascer ou pôr-do-sol, além da complexidade para sua determinação. Para a Floresta Amazônica, de acordo com Shuttleworth et al. (1984) e Santos Alvalá (1993), S foi considerado muito pequeno, quando comparado com os demais fluxos, a ponto de também ser desprezado. Para o manguezal, devido à carência de informações a este respeito, optamos por estimar o fluxo de calor no solo, então, os fluxos de calor no manguezal ou outro tipo de vegetação de suficiente extensão horizontal ou na ausência de advecção, geralmente satisfazem a equação do balanço de energia, eq.(1), que pode ser expressa simplificada da seguinte forma:

$$R_n = H + LE + S \quad (2)$$

onde, os fluxos de energia no sentido da camada em estudo são considerados positivos e aqueles para fora dela são negativos.

A determinação do transporte de calor sensível entre o dossel global e um nível de referência foi realizada através do método das resistências, conforme a equação:

$$H = \rho_d c_p \left(\frac{T_f - T_a}{r_a} \right) \quad (3)$$

onde, ρ_d é a massa específica do ar seco a 1 atm ($1,29 \text{ kg m}^{-3}$), c_p é o calor específico do ar a pressão constante ($1,00 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), à 20°C , e r_a é a resistência aerodinâmica global ($s \cdot m^{-1}$), isto é, a resistência atmosférica ao transporte de vapor d'água e de calor entre a altura de rugosidade e o nível de referência dentro da camada atmosférica. A eq.(3) mostra que o fluxo de calor sensível é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura e inversamente proporcional à resistência imposta pelo ar ao transporte dessa propriedade.

De acordo com Nichols (1992) e Santos Alvalá (1993), r_a pode ser parametrizada como:

$$r_a = \frac{r_b}{2 LAI} \quad (4)$$

onde LAI é o índice de área foliar e r_b a resistência média da camada limite por unidade de área de vegetação em $s \cdot m^{-1}$, expressa por:

$$r_b = \left(\frac{a}{n'} \right) \frac{\left(\frac{D}{u} \right)^{\frac{1}{2}}}{1 - \exp \left(\frac{-n'}{2} \right)} \quad (5)$$

sendo $\alpha = 100 \text{ s}^{1/2} \text{ m}^{-1}$, n' o coeficiente de atenuação para a velocidade do vento (adimensional), D a largura característica das folhas (m) e u a velocidade do vento na altura do topo do dossel em m s^{-1} (NICHOLS, 1992).

O transporte de calor latente entre a vegetação e a atmosfera apresenta uma relação similar àquela para o calor sensível sendo que os únicos obstáculos ao fluxo são a resistência aerodinâmica, r_a , e a resistência estomática, r_s (s m^{-1}). Assim, o fluxo de calor latente pode ser expresso como:

$$LE = \rho_d \left(\frac{c_p}{\gamma} \right) \left(\frac{e_s(T_p) - e}{r_a + r_s} \right) \quad (6)$$

onde, γ é a constante psicrométrica, $e_s(T_p)$ é a pressão de saturação do vapor em hPa à temperatura T_p , e a pressão de vapor em hPa na altura considerada.

O transporte de calor no solo ocorre primariamente por condução molecular, com influências secundárias dos transportes por radiação e convecção. Assim, este transporte pode ser modelado como um fenômeno de condução de calor, cujo fluxo de calor no solo foi estimado tomando-se por base a lei de Fourier na equação:

$$G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \cong \lambda \frac{T_s - T_l}{l} \quad (7)$$

onde λ é a condutibilidade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T_s e T_l são as temperaturas do solo à superfície, s , e na profundidade l , respectivamente. Neste caso a equação acima é aplicada apenas para o escoamento de calor na vertical, considerando-se os valores de temperatura do solo a 2 cm (s) e 5 cm (l) de profundidade.

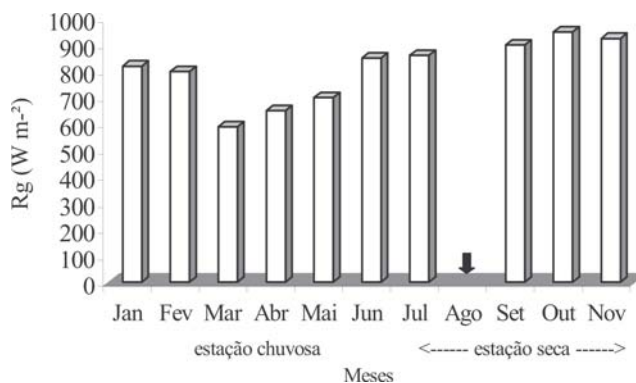
RESULTADOS

Radiação solar global e radiação fotossinteticamente ativa

O monitoramento da radiação solar global foi realizado durante o período de janeiro a novembro de 1997, com algumas falhas de dados devido a problemas instrumentais ocorridos nos meses de abril (ausência de dados entre os dias 2 e 20), maio (ausência de dados entre os dias 13 e 17) e agosto (não houve coleta de dados). A figura 5 apresenta os valores médios mensais dos valores extremos de radiação solar global durante o ano de 1997, em que a seta em destaque indica a ausência total de dados no mês de agosto. Nota-se a grande disponibilidade de energia solar incidente no manguezal durante o ano todo, com valores mais elevados durante a estação seca. O valor máximo da radiação solar foi 950 W m^{-2} e ocorreu em outubro, com o mínimo em março (650 W m^{-2}). Este resultado relaciona-se com o maior valor acumulado de precipitação no mês de março, de acordo com a série climatológica, cujo adensamento da nebulosidade reduz a incidência da radiação solar global à superfície. A radiação solar média incidente para todo o período foi de 805 W m^{-2} . A

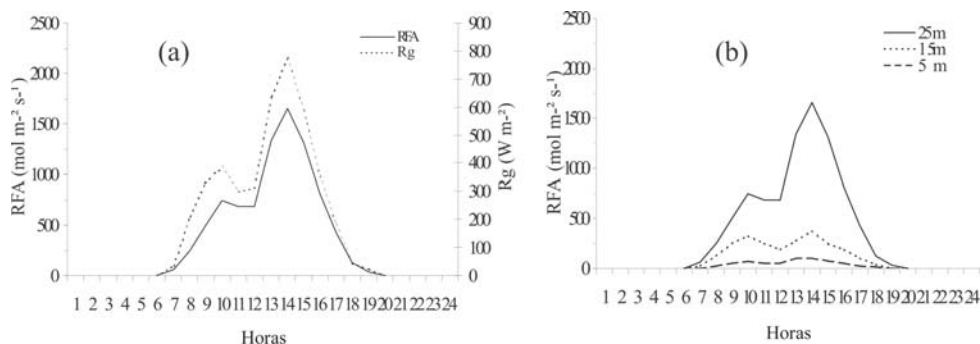
Amazônia possui valores elevados de radiação solar global, durante o ano todo, cuja variação sazonal, além de determinar o comportamento do balanço de radiação, apresenta diferentes quantidades quanto a sua distribuição, associada com a turbidez na atmosfera, cobertura de nuvens, dentre outros fatores.

Figura 5 – Variação sazonal da radiação solar global medida acima da copa das árvores no manguezal, durante o ano de 1997



Os resultados obtidos para o dia 21/03/97 são mostrados na figura 6. A figura 6a mostra a boa correlação entre as medidas de radiação solar global e RFA, sugerindo que os registros de radiação solar global poderiam ser utilizados para a estimativa de densidade de fluxo de fóton de RFA.

Figura 6 – (a) Variação horária da radiação solar global (Rg) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e (b) perfis horários da radiação fotossinteticamente ativa, nos níveis de 5, 15 e 25 m de altura a partir da superfície do solo, em 21/03/97



Durante todo o período de observações os valores de RFA a 25 m de altura variaram de zero (ao nascer do sol) até um máximo de 1656,2 mol m⁻² s⁻¹, às 14:00 h, mesmo horário em que a radiação solar global atingiu o valor máximo de 775 W m⁻². O declínio nas curvas de RFA e Rg entre 10:00 e 12:00 h são reflexo do bloqueio momentâneo da radiação solar, devido ao maior adensamento de nuvens neste período.

A atenuação da radiação fotossinteticamente ativa ao penetrar na profundidade do dossel é verificada na Figura 6b, cujos registros mostram uma redução de 77% a 15 m (9 m abaixo do topo das árvores) e 94% a 5 m (17 m abaixo do topo das árvores), nos horários de maior insolação. Estes percentuais mantiveram-se durante os seis dias de medições, representando os efeitos de atenuação específicos do local de medição fortemente influenciados por árvores da espécie *Avicennia germinans*. Também observa-se o efeito da nebulosidade entre 10:00 e 12:00 h, o qual influenciou no comportamento da RFA na altura de 15 m e com menos intensidade a 5 m. No geral as linhas de RFA apresentam tendências aproximadas em suas curvaturas. O efeito de atenuação devido a absorção da RFA através do dossel é bastante notado a 5 m, onde o valor máximo foi de $100 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ às 14:00 h, enquanto a 15 e 20 m os valores máximos atingiram 375 e $1656,2 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Balanco de energia

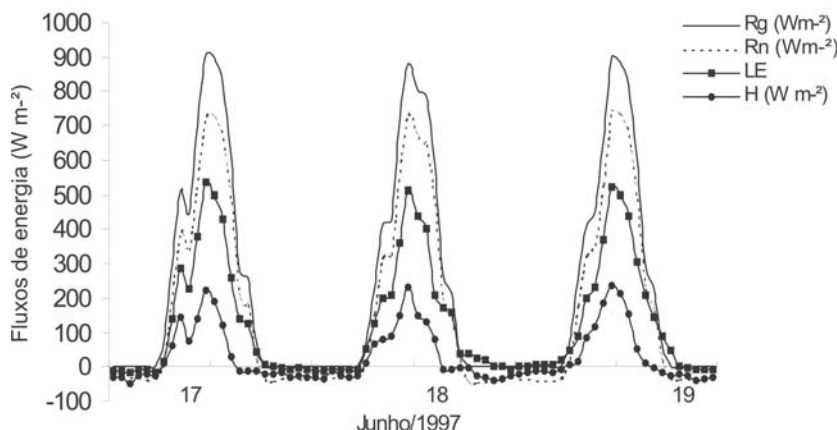
Os resultados das estimativas do saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e suas relações com as variações da radiação solar global para os dias 17, 18 e 19/06/97 são apresentados na figura 7. O fluxo de calor no solo não foi apresentado nesta análise, porque este parâmetro representa uma parcela de contribuição muito pequena ao balanço de energia, em especial nesta escala de tempo adotada. Portanto, os valores do fluxo de calor no solo serão desprezados nesta análise. As flutuações do saldo de radiação e da radiação solar global apresentam-se em fase e são percebidas nos horários de início de formação das primeiras nuvens (do tipo cumulus), as quais atingiam um adensamento máximo em torno de 10:00 e 11:00 h, ressaltando que no período em estudo não houve ocorrência de precipitação. Este adensamento de nuvens causou uma redução na quantidade de radiação solar incidente, com destaque no dia 17/06/97. As estimativas do saldo de radiação acompanham sistematicamente as variações nos valores medidos de radiação solar global, cuja média horária no dia 17 representou 76% da radiação solar global incidente no manguezal. A radiação solar incidente atingiu o pico às 12:00 h, com total de 908 W m^{-2} e saldo de radiação de 730 W m^{-2} no mesmo horário. Neste horário foram observados os máximos do saldo de radiação e da radiação solar nos dias 18 e 19/06/97.

No dia 18/06/97 o saldo de radiação representou 78% da radiação solar global e no dia 19 foi equivalente a 79%. O efeito da nebulosidade é notado às 10:00 h e 13:00 h no dia 18 e em menor proporção entre os horários de 9:00 h e 10:00 h, quando a radiação solar variou pouco. Em todos os dias, entre 16:00 e 17:00 h houve uma atenuação nos gradientes de radiação solar e saldo de radiação, o que também pode ser efeito da nebulosidade, desta vez por aumentar a contribuição da radiação solar difusa sobre o manguezal. Notou-se que a presença da nebulosidade influencia o comportamento do balanço de radiação, por interceptar parte da radiação solar incidente e por direcionar os fluxos de radiação difusa para a superfície.

Durante a noite o termo dominante do balanço de radiação é o balanço de radiação de ondas longas, daí, os valores negativos do saldo de radiação no período noturno até próximo ao amanhecer. No entanto, as perdas em ondas longas não excederam a -41 W m^{-2} observado às 19:00 h do dia 18.

O saldo de radiação significa uma parcela da energia solar que foi absorvida pela superfície e que está disponível para ser utilizada para diversos fins, tais como nos processos de evapotranspiração, aquecimento do ar e no processo de fotossíntese nos mangues. Esta partição pode ser avaliada a partir das flutuações das estimativas do fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível, cujos valores apresentam certa sensibilidade quanto às variações da radiação solar global e saldo de radiação.

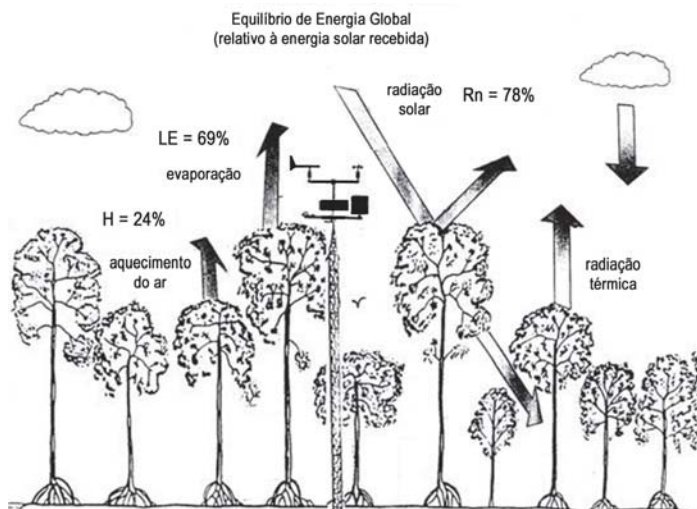
Figura 7 – Variação média horária da radiação solar global (R_g) e dos componentes do balanço de energia: saldo de radiação (R_n), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H), para os dias 17, 18 e 19/06/97



No ciclo diurno, o fluxo de calor latente foi equivalente 69% do saldo de radiação no dia 17, 68% no dia 18 e 71% no dia 19, com valores máximos de 536 W m^{-2} no dia 17, 510 W m^{-2} no dia 18 e 520 W m^{-2} no dia 19, no horário de 12:00 h. O fluxo de calor sensível representou 23% do saldo de radiação no dia 17, 24% no dia 18 e 25% no dia 19, com fluxos máximos de 220 W m^{-2} no dia 17, 230 W m^{-2} no dia 18 e 235 W m^{-2} no dia 19.

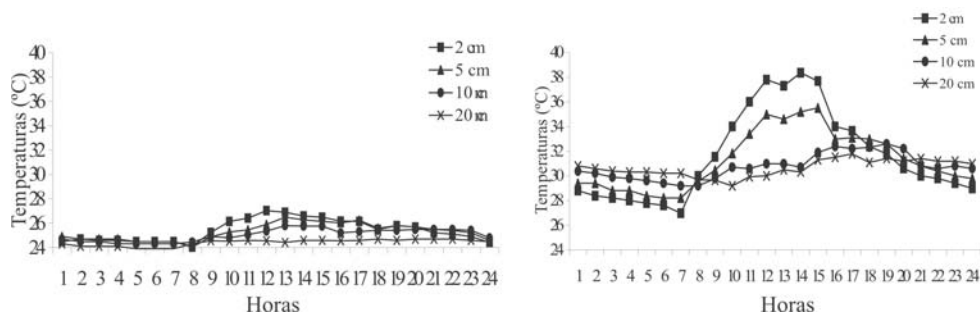
Nas estimativas dos fluxos de calor latente e sensível podem ocorrer erros na determinação da resistência aerodinâmica global, a qual é extremamente sensível às características morfológicas das plantas. Na parametrização da resistência estomática, os erros podem ser decorrentes da não consideração de todos os processos biológicos e os fatores ambientais que controlam os mecanismos fisiológicos, tais como o potencial de água nas folhas e a concentração de CO_2 . Estas respostas fisiológicas influenciam no comportamento do balanço de energia na superfície, o que mostra a importância de se melhorar os modelos para assimilar melhor estas respostas.

A figura 8 mostra a partição dos componentes do balanço de energia no manguezal, relativo à energia solar recebida nos dias 17, 18 e 19/06/97. No ciclo médio diurno, o saldo de radiação representou 78% da radiação solar recebida, enquanto o fluxo de calor latente foi equivalente a 69% do saldo de radiação e o fluxo de calor sensível representou 24% do saldo de radiação. Os 7% restantes para completar o equilíbrio de energia foram utilizados para outros fins, como armazenamento na biomassa, fotossíntese, erros aleatórios de medidas, etc.

Figura 8 – Esquema dos componentes do balanço de energia no manguezal**Alterações decorrentes do desmatamento do manguezal**

A temperatura do solo, assim como o fluxo de calor no solo do manguezal sofre complexas modificações durante o ano, devido ao aporte de materiais que são transportados do mar para o interior do manguezal e vice-versa. Além disso, o influxo de água salina para dentro do solo é constante através dos canais de entrada, o que torna o balanço anual destas variáveis extremamente complexo.

As flutuações da temperatura no solo são descritas experimentalmente para períodos de flutuações diárias, através da composição média da campanha experimental no período de 17 a 20/06/97, representadas na figura 9a, para o manguezal em seu estado natural, e na Figura 9b, para a área desmatada. Para essas ondas, aproximadamente senoidais quando normalizadas, a maior flutuação (maior amplitude) ocorre próximo à superfície do solo (2 cm), com 2,9°C no manguezal e 11,3°C na área desmatada.

Figura 9 - Variação média horária dos perfis das temperaturas do solo no manguezal natural (a) e na área desmatada (b), no período de 17 a 20/06/97

Conforme a onda passa a decair dentro do solo, sua amplitude é bastante amortecida e o atraso do tempo de oscilação, com relação àquele na superfície, aumenta. As flutuações diárias decrescem exponencialmente com a profundidade e a 20 cm representam 27,6% daquelas junto à superfície no manguezal e 23% na área desmatada. As flutuações a 20 cm são também demoradas, sendo a máxima neste nível para o manguezal atingida às 18:00 h e a mínima às 7:00 h. Já na área desmatada a máxima a 20 cm ocorreu às 17:00 h (31,8°C) e a mínima 29,2°C às 10:00 h. Estas diferenças são relacionadas ao suprimento de calor fornecido da superfície para dentro do solo e de dentro do solo para a superfície.

A temperatura da superfície é dominada pelos fluxos de radiação incidente e re-irradiação e, conseqüentemente, apresenta maior variação sendo muito influenciada pelo grau de nebulosidade. A nebulosidade influi na redução da amplitude das ondas térmicas superficiais durante o dia. Por outro lado, à noite, a nebulosidade impede um maior resfriamento do solo assim como da atmosfera. O efeito da nebulosidade pode ser notado na inclinação inversa na curva de temperatura do solo na área desmatada. Nos níveis de 2 e 5 cm a inclinação é observada às 13:00 horas, enquanto nos níveis de 10 e 20 cm esta inclinação é observada às 14:00 horas.

A máxima temperatura do solo no manguezal atingiu 27,0°C às 12:00 h, enquanto na área desmatada este extremo chegou a 38,3°C às 14:00 h. O solo exposto da área desmatada tem a capacidade de transferir a energia solar absorvida na superfície para as camadas inferiores do solo, porém, não apresenta a mesma eficiência quanto a retenção da energia transferida e armazenada abaixo da superfície, logo, nota-se no período noturno, rápidas perdas radiativas, que são percebidas na análise da amplitude térmica diária, que alcançou 11,3°C, no nível de 2 cm de profundidade. Já no manguezal, onde o armazenamento de energia é mais eficiente, a amplitude térmica diária a 2 cm de profundidade foi de 2,9°C.

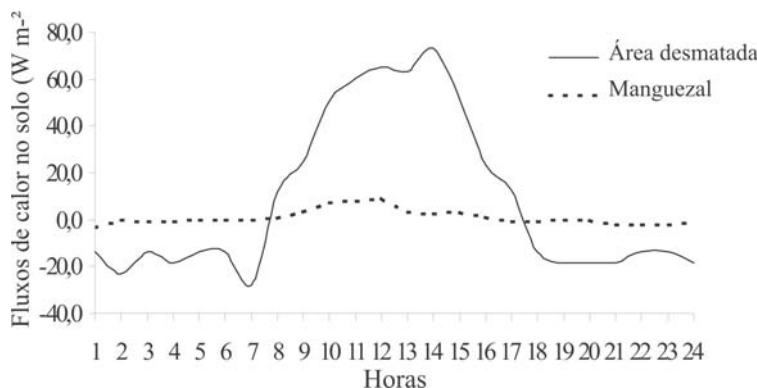
É interessante destacar que durante as amostragens de temperatura do solo não houve registro de precipitação, bem como não ocorreu inundação da área desmatada pelo efeito das marés. A dinâmica termal do solo precisa ser interpretada considerando-se também os períodos de marés altas (águas de março), porém, observacionalmente, não foram preponderantes para a regeneração do mangue.

A estrutura mais proeminente da variação diurna do perfil de temperatura no solo é a zona de alta temperatura, que se origina à superfície e que é resultado do intenso aquecimento pela radiação solar durante o dia. No fim da tarde essa zona se propaga para baixo, decrescendo em intensidade nas camadas mais profundas do solo. Este efeito é nítido ao observarmos os perfis das temperaturas do solo na área desmatada.

O efeito de atenuação da radiação solar global ao atingir a superfície do solo no manguezal ficou destacado na figura 9, cuja absorção da radiação solar global através do dossel vegetativo reduz o aquecimento superficial no manguezal e aumenta o mesmo na área desmatada. Como o solo na área desmatada é do tipo gleissolo com textura granular pouco espessa e tonalidade escura, estas características contribuem com as taxas de temperatura bastante elevadas, principalmente a 2 e 5 cm de profundidade, o que evidencia a grande capacidade de absorção da radiação solar incidente.

As maiores variações do fluxo de calor na área desmatada em relação ao manguezal são mostradas na figura 10. Tais valores elevados tanto para o interior do solo quanto para a superfície são resultantes, evidentemente, do maior grau de aquecimento na área desmatada. No manguezal o valor máximo do fluxo de calor no solo foi de apenas 9,4 W m⁻², enquanto na área desmatada o fluxo máximo atingiu 73,1 W m⁻². Neste local, entre 8:00 h e 18:00 h prevalecem os fluxos positivos de calor (da superfície do solo em direção às camadas inferiores); entre 19:00 h e 07:00 h os fluxos se invertem e tornam-se negativos (das camadas inferiores em direção a superfície do solo). Como no manguezal há pouca variação nos fluxos de calor no solo, ocorrem valores positivos apenas entre 8:00 h e 16:00 h, com um valor máximo de 9,4 W m⁻² às 12:00 h.

Figura 10 – Variação média horária do fluxo de calor no solo no manguezal e na área desmatada, no período de 17 a 20/06/97



As trocas diárias do transporte vertical de calor no solo não aprofundam mais que 30 cm a 50 cm, cujo fluxo de calor é feito por condução molecular em ondas. Especialmente na área desmatada a característica diária mais comum funciona da seguinte forma: durante o dia o solo absorve radiação solar (ondas curtas), se aquece e transmite calor para as camadas inferiores. A superfície do solo portanto é fonte de calor para as camadas mais profundas do solo (e para a atmosfera) durante o dia. No período noturno a superfície do solo perde mais radiação de ondas longas para a atmosfera, se resfria, e o fluxo de calor ocorre das camadas mais inferiores do solo (que haviam armazenado calor) para a superfície. O ar logo acima, aquecido, passa então a emitir calor em direção à superfície do solo, ocorrendo então fluxo de calor tanto da atmosfera para a superfície do solo, quanto das camadas mais profundas do solo em direção à superfície. Assim, a superfície do solo durante a noite funciona como sumidouro de calor da atmosfera e das camadas inferiores do solo.

No ciclo diário este processo ocorre devido ao aquecimento da superfície do solo que gera processos de dissipação de calor na atmosfera junto da superfície, que tendem a reduzir o aquecimento superficial. Estes processos acentuam-se e atingem uma intensidade máxima quando o balanço de radiação é máximo. Com a diminuição do balanço de radiação, os processos de dissipação passam a predominar sobre o processo de aquecimento da superfície do solo, de modo a promover o seu resfriamento, embora o balanço de radiação seja positivo.

Na análise dos dias em estudo (17 a 20/06/97), percebe-se que há um aquecimento maior na profundidade de 10 cm em relação às temperaturas entre 2 e 5 cm, sendo a variação da temperatura um pouco maior a 5 cm. Isto se dá devido às perdas radiativas que transportam calor da superfície do solo para a atmosfera, e com isso o transporte de calor ocorre das camadas mais profundas do solo em direção à superfície.

Como resultado da atenuação da radiação solar incidente através das camadas mais elevadas do dossel, a quantidade de radiação que chega a superfície é consideravelmente inferior àquela incidente no topo do dossel vegetativo e, portanto, o aquecimento superficial é menos elevado. Assim, as amplitudes térmicas variam de 2,0°C a 2 cm até 0,6°C a 30 cm no dia 14/05, e no dia 18/06 de 2,2°C a 2 cm até 0,7°C a 30 cm de profundidade. Portanto, enquanto o saldo de radiação à superfície é positivo, o calor vai sendo conduzido e armazenado no interior do solo. Quando o saldo de radiação é negativo, a superfície é suprida pelo fluxo ascendente de calor no solo. Assim, no ciclo diário do fluxo de calor no solo, destacam-se os transportes de calor da superfície do solo em direção às camadas mais profundas durante o dia e o inverso ocorrendo durante a noite.

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados neste trabalho, observou-se uma disponibilidade de radiação solar global sempre elevada no manguezal de Bragança, localizado na Região Equatorial, com valor máximo em outubro (950 W.m^{-2}) e mínimo em abril (650 W.m^{-2}). A radiação fotossinteticamente ativa que atinge a copa das árvores, ao penetrar no interior do manguezal, é bastante atenuada, com uma redução de 77% no nível de 15 m e 94% a 5 m de altura.

Na partição dos componentes do balanço de energia, para o período de 17 a 19/06/97, verificou-se que o saldo de radiação foi equivalente a 78% da radiação solar incidente, o fluxo de calor latente correspondeu a 69% do saldo de radiação, enquanto o fluxo de calor sensível representou 24 % do saldo de radiação.

As temperaturas do solo apresentam os mínimos valores a partir do momento em que o balanço de radiação passa de negativo a positivo, ou seja, no momento em que recomeça o armazenamento e transporte de energia solar em direção ao solo. Tais mínimos apresentam defasagem de cerca de uma hora de retardo, em relação aos valores mínimos de temperatura do ar, aumentando esta defasagem conforme aumenta a profundidade. O mesmo padrão foi notado para os valores de máxima temperatura. O efeito de transporte do solo em direção à superfície pôde ser observado durante a madrugada, quando a temperatura a 10 cm chega a suplantá-la as medidas a 2 e 5 cm de profundidade.

Quanto ao armazenamento de energia, observamos que na área desmatada uma parte considerável da energia absorvida devido à insolação é conduzida para as camadas mais profundas, enquanto no manguezal em seu estado natural esta transferência é muito pequena. Esta condução e armazenamento de calor são gerados em função do elevado grau de aquecimento sobre a superfície na área desmatada devido a exposição à incidência direta da radiação solar, ao passo que no manguezal a quantidade de radiação que chega à superfície é bastante reduzida devido às múltiplas reflexões que ocorrem quando a radiação penetra no dossel até atingir a superfície.

No manguezal, portanto, o solo é protegido da forte radiação e da maior perda de energia radiante. Na fase de perda líquida de energia do solo (ou seja, à noite) a direção do transporte de calor no solo se inverte. O calor armazenado durante o dia é conduzido de volta para a superfície do solo, a qual, durante a noite, tornara-se mais fria. Há, portanto, flutuações diurnas da temperatura na parte superior do solo até 20 cm de profundidade. De um modo geral, o solo atua como um tampão térmico no equilíbrio de calor de um habitat, absorvendo quantidades consideráveis de calor durante o dia com o propósito único de as liberar novamente à noite. Este processo torna-se mais acentuado quando o manguezal é desmatado.

O ecossistema manguezal possui um metabolismo que é dependente de um balanço térmico diferente daquele encontrado na área desmatada. A absorção da radiação infravermelha no manguezal foi mais evidenciada no período noturno, quando as temperaturas foram mais elevadas do que na área desmatada. A vegetação tem a capacidade de reter mais as perdas radiativas em ondas longas, devido, entre outros aspectos, especialmente ao armazenamento de energia na biomassa e à concentração de vapor d'água abaixo do dossel, enquanto na área desmatada acontece maior perda radiativa.

REFERÊNCIAS

- BLASCO, J.F. Climatic factors and the biology of mangrove plants. In: THE MANGROVE ECOSYSTEM, 1984, Paris. **Research Methods**. Paris: UNESCO, 1984. p.20-35.
- BRUIN, H. A. R.; HOLTSLAG, A.A.M. A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime with the Penman-Monteith concept. **Journal of Applied Meteorology**, v.21, p.1610-1621.1982
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, v.11, p.742-744.1975
- CHAPMAN, V.J. **Ecosystems of the world: wet coastal ecosystems**. New York: Elsevier, 1977.
- COLLATZ, G.J. et al; Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.54, n.1-2, p.107-136, 1991.
- DIEGUES, A.C.S. **Ecologia humana e planejamento em áreas costeiras**. São Paulo: NUPAUB-USP. 1996.
- HERZ, R. **Distribuição dos padrões espectrais associados à estrutura física dos manguezais de um sistema costeiro subtropical**. São Paulo. 378 f. Tese (Livre-Docência) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 1988.
- HERZ, R. **Manguezais do Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo/ Instituto Oceanográfico, CIRM.1998.
- HORTON, R.; WIERENGA, P.J. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface. **Soil Science Society American Journal**, v.47, p.14-20. 1983.
- MEEK, D.W. et al. A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. **Agronomy Journal**, v.76, p.939-945.1984.
- MONTEITH, J.L. Principles of environmental physics. New York: American Elsevier Publishing Company. 1973.
- NICHOLS, W.D. Energy budgets and resistances to energy transport in sparsely vegetated rangeland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.60, n.3-4, p.147-221, Aug. 1992.
- PICCOLO, M.C.; PERILLO, G.M.E.; DABORN, G.R. Soil temperature variations on a tidal flat in minas basin, bay of fundy, Canada. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, v.35, p.345-357. 1993.
- RIBEIRO, J.B.M. **Micrometeorologia do manguezal e o impacto do desmatamento em Bragança-PA**. 2001. 145 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 2001.
- SANTOS ALVALÁ, R.C. **Estudo da partição de energia em terrenos complexos (áreas desflorestadas e florestas)**. São José dos Campos. 149f. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.1993.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CINTRON-MOLERO, G. Mangroves as an integrated ecosystem: In: SWAMINATHAN, M. S. **A global network of mangrove genetic resource centres, resource foundation**. Madras: India.1991. 132p.
- SHUTTLEWORTH, W.J. et al. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.110, n. 466, p. 1143-1162, Oct. 1984.

SILVA, J.F, HERZ, R. Estudos de microclimas em ambientes de manguezais na região do complexo estuarino-lagunar de Cananéia. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA, 1987, Cananéia-SP. **Síntese dos conhecimentos**. Cananéia-SP,1987.

SILVA, N.S.M.; CARVALHO, E.A.; MELLO, C.F. Levantamento preliminar das angiospermas do manguezal da estrada de Ajuruteua, município de Bragança (PA). In: WORKSHOP INTERNACIONAL DO PROGRAMA MADAM, 3., 1997, Belém. **Resumos**. Belém: UFPA.1997. v.1, p.3.

SNEDAKER, S.C. Mangrove species zonation: why? In: SEN,C.N; RAIPURDHIT, K.S. **Tasks for vegetation science, the hague**.[S.l.: s.n.], 1982. p.25-111.

Recebido em setembro de 2006

Aceito em março de 2007