

FLUXOS DE MASSA E ENERGIA EM UMA FLORESTA TROPICAL NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

RENATA GONÇALVES AGUIAR^{1,2}, CELSO VON RANDOW³, NICOLAU PRIANTE FILHO²,
ANTONIO OCIMAR MANZI⁴, LEONARDO JOSÉ GONÇALVES AGUIAR⁵ e
FERNANDO LUIZ CARDOSO¹

¹ Universidade Federal de Rondônia (UNIR).

Rua Rio Amazonas, 351. B. Jd. dos Migrantes, CEP: 78960-000, Ji-Paraná, Rondônia.

² Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT),

Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Departamento de Física/ICET, Bloco F, sala 204.
Av. Fernando Corrêa, s/n, Cidade Universitária, CEP: 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso.

³ Alterra, Wageningen University and Research Centre. PO box 47, 6700 AA Wageningen Netherlands.

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

Av. André Araújo, 2936, Alojamento nº 09, Aleixo, CEP: 69060-001. Manaus, Amazônia.

⁵ Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Av. Gomes Barbosa, 930, casa 1, Centro, CEP: 36570-000, Viçosa, Minas Gerais.

Recebido Setembro 2005 - Aceito Agosto 2006

RESUMO

Medidas de fluxo de dióxido de carbono, calor sensível e calor latente foram realizadas utilizando o método de covariância de vórtices turbulentos em uma área de floresta tropical úmida. Os dados foram coletados no ano de 2004 na reserva Biológica do Rio Jaru, em Ji-Paraná - Rondônia. Foram analisados os padrões de variabilidade sazonal e do ciclo diurno dos fluxos de massa e energia e das variáveis meteorológicas deste sítio experimental e comparados com o comportamento dos fluxos de massa e energia coletados nos anos de 1999 a 2002 em um antigo sítio localizado na mesma reserva a apenas 13 km de distância. No sítio em estudo o fluxo de calor latente apresentou clara variação sazonal, indicando uma diminuição de 19,6% na estação seca e o fluxo de calor sensível teve variação sazonal inversa à variação do fluxo de calor latente, apresentando aumento de 118,2% na estação seca. Embora não conclusiva, a integração dos dados de fluxos de CO₂ indicaram uma absorção pelo ecossistema equivalente a 4,4 t C ha⁻¹ ano⁻¹. De modo geral, na comparação dos fluxos de massa e energia entre os sítios experimentais antigo e atual verificou-se que o atual apresentou maior resposta à estação seca.

Palavras-chave: Troca líquida de dióxido de carbono no ecossistema (NEE), método de covariância de vórtices turbulentos, fluxo de calor latente.

ABSTRACT: MASS AND ENERGY FLUX OVER TROPICAL FOREST IN THE SOUTH WEST AMAZON

Measurements of fluxes of carbon dioxide, sensible heat and latent heat were made using the eddy covariance method in a tropical forest area in South West Amazon. The data were collected in the year of 2004 at the Biological Reserve of Jaru River, in Ji-Paraná, Brazilian state of Rondônia. Seasonal and daily patterns of variability of the fluxes and the meteorological variables were analyzed at this experimental site and compared with the behavior of the mass and energy flux data collected from 1999 to 2002 in one old site located in the same reserve only 13 km away. In the site in study the latent heat flux showed a clear seasonal change, presenting a reduction of 19,6% in the dry season, and the sensible heat flux had an inverse variation, presenting increase of 118,2% in the dry season. Although not conclusive, the integration of CO₂ fluxes indicate a carbon uptake rate by the ecosystem, equivalent to 4,4 ton C ha⁻¹ year⁻¹. In general, comparing mass and energy flux between the experimental sites old and new was verified that the new one presented larger response to the dry season.

Keywords: Net ecosystem exchange (NEE), eddy covariance, latent heat flux.

1. INTRODUÇÃO

A acentuada interferência humana nos ecossistemas naturais através do desflorestamento e das queimadas e o crescente aumento da queima de combustíveis fósseis são os maiores responsáveis por mudanças climáticas ocorridas no mundo (MALHI & GRACE, 2000; RUSTAD, 2001). Isso se deve principalmente à elevada emissão de CO₂ que essas atividades acarretam, provocando inúmeros distúrbios climáticos e ecológicos.

Em contrapartida aos problemas gerados pelos altos níveis de CO₂ na atmosfera, a Floresta Amazônica desempenha importante papel no clima regional e global. Com uma extensa área de floresta tropical úmida, ela influi no clima principalmente através da emissão ou retenção de gases e da evapotranspiração - isto é, transpiração das plantas e evaporação da água retida nas folhas, caules, na serrapilheira e no solo. Assim, de um lado a Floresta Amazônica é grande fornecedora de vapor de água (calor latente) para a atmosfera e de outro atua como importante 'seqüestradora do excesso' de gás carbônico atmosférico. O entendimento e a quantificação dos processos relacionados ao balanço de energia e ao ciclo de carbono da Amazônia são, portanto, relevantes para a formulação de políticas ambientais e climáticas (BALDOCHI et al., 1996; FALKOWSKI et al., 2000), visto que desempenham importante papel no funcionamento do clima e da biologia na Terra.

Alguns estudos já foram realizados na Amazônia com o intuito de entender esses processos (GRACE et al., 1995; MALHI et al., 2002; CARSWELL et al., 2002; ANDREAE et al., 2002). Devido porém à heterogeneidade da ampla área de terra que a Amazônia ocupa alguns parâmetros não se comportam da mesma maneira em áreas com diferentes taxas de nutrientes, precipitação e radiação solar, por exemplo. Desta forma, devido à pequena cobertura geográfica de sistemas para quantificar se as florestas estão ou não assimilando carbono, FEARNSTIDE (2003) considera possível que a absorção encontrada em um local possa ser contrabalanceada por emissões em outros locais, sendo assim necessário um maior número de medidas para que os dados coletados possam ser considerados representativos.

Além disso, a grande variabilidade nos valores de fluxos de CO₂ medidos em cada local, exige séries longas de dados para a obtenção de resultados mais conclusivos. Por isso, quanto mais estudos e com séries mais longas de dados forem realizados melhor será o entendimento dos processos biológicos desta complexa região, facilitando a construção de modelos de balanço de carbono e de energia válidos para toda a Floresta Amazônica.

No Estado de Rondônia vêm sendo realizadas, desde fevereiro de 1999, medidas contínuas dos fluxos de momentum, de calor sensível e latente e de dióxido de carbono (CO₂) no sítio experimental do LBA - Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia - situado na Reserva Biológica

do Rio Jaru, em Ji-Paraná, no sudoeste da Amazônia. Além dos fluxos de energia e massa, são monitoradas também as variáveis meteorológicas. Mas, em novembro de 2002, devido à ocorrência de queimadas muito próximas à torre, ocasionadas por invasores, a mesma foi desativada. A estação meteorológica e o sistema de medidas de fluxos turbulentos só foram reativados em janeiro de 2004, dentro da mesma reserva, porém a aproximadamente 13 km ao sul da posição anterior.

Tendo em vista a necessidade de entender os processos relacionados ao balanço de energia e ao ciclo do carbono, este trabalho teve o propósito de analisar os padrões de variabilidade sazonal e do ciclo diurno dos fluxos de massa e energia e das variáveis climatológicas medidas no ano de 2004 no sítio experimental referido acima e comparar o comportamento desses fluxos do atual sítio com o do antigo para verificar se a mudança de local modificou os padrões de variabilidade dessas variáveis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do sítio experimental

As medidas foram realizadas em uma área de floresta tropical úmida (floresta amazônica), no sítio experimental da Reserva Biológica do Rio Jaru, uma reserva protegida do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis - IBAMA, situada a Leste no Estado de Rondônia, onde está instalada uma torre micrometeorológica com 61,5 metros de altura, que faz parte de uma rede de torres do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia - LBA.

As localizações antiga (A) e atual da torre (C) podem ser observadas na Figura 1. Na posição antiga a torre se encontrava a 600 metros da margem do Rio Machado e havia uma área desflorestada ao seu redor. Hoje a torre se encontra a 1.240 m da margem do rio e em uma região mais preservada.

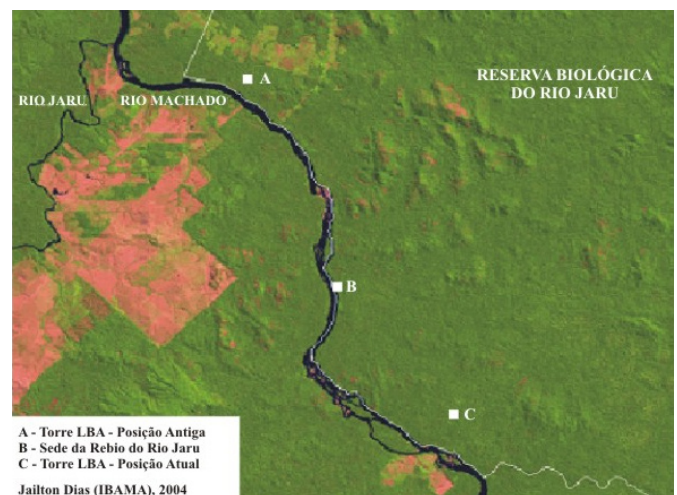


Figura 1 – Localização das posições antiga e atual da torre micrometeorológica na Reserva Biológica do Rio Jaru.

A região de floresta primária, classificada como *Floresta Ombrofila Aberta* (CULF et al., 1997), possui uma vegetação com características de terra-firme, com altura média do dossel de aproximadamente 35 m, sendo que algumas árvores emergentes podem atingir até 45 m. A altitude da área da reserva varia entre 120 e 150 m acima do nível do mar, e o solo é caracterizado como Podzólico vermelho amarelo (HODNETT et al., 1996).

2.2. Instrumentos e Métodos

As medidas de fluxos de dióxido de carbono, calor sensível e calor latente foram determinadas pelo método de covariância de vórtices turbulentos com o emprego de sensores de resposta rápida. Esse sistema é composto por um anemômetro sônico tridimensional (Solent 1012R2, Gill Instruments, Lymington, UK), que mede as três componentes da velocidade do vento - velocidade horizontal do vento a leste, velocidade horizontal do vento a norte e a velocidade vertical do vento - e a temperatura do ar, e um analisador de gás por infravermelho de caminho aberto (LI-7500, LICOR Inc., Lincoln USA), que mede as concentrações de vapor de água e dióxido de carbono.

Após coleta semanal, os dados foram processados com a rotina computacional Alteddy (ELBERS, 1998), desenvolvido pela Instituição Alterra da Holanda, o qual procede a uma série de correções antes de calcular os fluxos turbulentos (AUBINET et al., 2000). O intervalo de tempo utilizado no cálculo das médias e flutuações dos sinais turbulentos foi de 30 minutos, em concordância com o que sugerem RANNIK & VESALA (1999), segundo os quais, para minimizar erros na estimativa de fluxos turbulentos é necessário usar intervalos de tempo relativamente longos.

Os sensores que medem a radiação solar incidente, saldo de radiação, radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, direção do vento, velocidade do vento e precipitação foram conectados a um sistema de aquisição de dados (Datalogger CR10X, Campbell Scientific Instrument, Utah, USA) programado para fazer uma leitura das medidas a cada 30 segundos e depois armazenar uma média a cada 30 minutos.

2.3. Estimativas de Variáveis

2.3.1. Componentes do Balanço de Energia

Nem todas as componentes do balanço de energia puderam ser medidas no período analisado, desta forma tiveram que ser estimadas com base em medidas feitas anteriormente. São elas: o fluxo de calor no solo (G) e a energia armazenada na biomassa e no dossel (S).

As medidas do fluxo de calor no solo foram estimadas por meio de uma regressão entre o saldo de radiação e o fluxo

de calor no solo feita com os dados de 1999, ano no qual havia o sensor de fluxo de calor no solo instalado. Os parâmetros estimados da equação de regressão foram significativos ao nível de 1%. O coeficiente de determinação encontrado foi $R^2 = 0,63$.

A energia armazenada no dossel e na biomassa foi calculada segundo a parametrização proposta por MOORE & FISCH (1986), sendo necessárias apenas as medidas de temperatura e umidade específica do ar em um único ponto da torre.

2.3.2. Troca Líquida de CO₂ no Ecossistema

A troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), que é a diferença entre o CO₂ absorvido pela fotossíntese e o perdido pela respiração (WOHLFAHRT et al., 2005), é estimada combinando as medidas do sistema de fluxos com medidas do perfil vertical da concentração de CO₂ abaixo deste sistema. O NEE é calculado pela soma dos fluxos medidos no topo da torre e da taxa de armazenamento de CO₂ na camada abaixo (LEE, 1998; GRACE et al., 1995).

Durante o ano de 1999 havia um sistema de medidas do perfil vertical da concentração de CO₂ (CIRAS SC, PP Systems, UK) instalado na torre da REBIO Jaru, mas em junho de 2000 o sistema foi desativado devido a problemas nos instrumentos. Assim, com a utilização das medidas do perfil vertical da concentração de CO₂ coletadas entre março de 1999 e junho de 2000 foram estimados os valores para 2004 conforme a metodologia que VON RANDOW et al. (2004) desenvolveram no referido trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variáveis Meteorológicas

3.1.1. Precipitação

Para caracterização do padrão pluviométrico nesta região de floresta foram apresentados os totais mensais dos últimos 5 anos de coletas (Tabela 1).

Na referida tabela observa-se que janeiro foi o mês que apresentou maior índice de precipitação, em média 500,00 mm. E o menor índice médio ocorreu em julho, com 13,60 mm. Em valores absolutos o menor e maior índice registrados foram em julho de 1999 (0,20 mm) e em janeiro de 2002 (516,94 mm), respectivamente.

Informações de monitoramento climatológico disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC indicaram que as chuvas na REBIO Jaru apresentaram-se abaixo da média histórica nos meses de março a julho de 2004, o que provavelmente afetou a recarga do reservatório hídrico dos solos, diminuindo, em consequência, a disponibilidade hídrica para a vegetação durante a estação seca.

Tabela 1 – Total mensal da precipitação (mm) na REBIO Jaru, registrado nos últimos 5 anos de coletas.

Meses	1999	2000	2001	2002	2004
Jan		490,40	496,98	516,94	
Fev		163,00	342,61	173,01	
Mar	12,00*	500,23	207,98	182,02	
Abr	157,40	182,79	165,79	280,80	
Mai	39,79	89,80	130,41	77,00	
Jun	76,40	2,00	41,20	8,20	43,00
Jul	0,20	8,80	34,60	23,59	0,80
Ago	12,80	13,40	0,25	35,20	7,40
Set	114,41	149,20	85,01	45,81	40,40
Out	127,59	171,80	284,40	144,00	165,8
Nov	112,60	263,38	338,00	99,80**	223,6
Dez	256,21	260,40	386,01		330,8
Total	909,40	2295,2	2513,24	1586,37	811,8

* 8 dias de medidas, ** 14 dias de medidas

De modo geral, observa-se que a precipitação segue um padrão sazonal bem definido, com um período de grandes quantidades de chuvas (estação chuvosa) usualmente entre novembro e março, e um período de estiagem (estação seca) nos meses de julho a setembro.

Para a comparação entre as estações chuvosa e seca foram utilizados os meses de janeiro a março para representar a estação chuvosa e os meses de julho a setembro para representar a estação seca.

3.1.2. Radiação Solar Incidente, Temperatura e Umidade Relativa do Ar

A radiação solar incidente (Figura 2a) apresentou padrões de variabilidade sazonal, que variou entre um valor médio diário de 188 W m^{-2} na estação chuvosa e 207 W m^{-2} na estação seca, apresentando um aumento de 10% em relação à estação chuvosa. Segundo ROCHA et al. (2004), mudanças sazonais na cobertura das nuvens são os principais fatores que determinam a variação da radiação solar incidente na Amazônia.

Durante a estação seca, devido a grande ocorrência de queimadas na região, a atmosfera passa a conter uma quantidade maior de partículas suspensas no ar, ocasionando menos radiação solar incidente. Entretanto, nas condições experimentais deste trabalho, a quantidade de partículas suspensas no ar que ocorreram durante a seca foi um fator menor limitante para a incidência da radiação solar do que a cobertura de nuvens durante as chuvas.

A temperatura média do ar apresentou pequena variação sazonal, a média diária encontrada na estação chuvosa foi de

24°C e na seca de 25°C . Entretanto teve grande amplitude térmica diária, a temperatura diária máxima variou entre 20 e 34°C e a mínima variou entre 14 e 24°C (Figura 2b).

No ciclo diurno as médias horárias mínima e máxima da temperatura do ar (não mostrado) na estação seca foram de $20,5^\circ\text{C}$ e 30°C respectivamente, ou seja, a amplitude térmica média foi de $9,5^\circ\text{C}$. Essa amplitude foi superior à da estação chuvosa que foi de aproximadamente 5°C . Esse comportamento é compatível com a menor taxa de cobertura de nuvens na estação seca, que propicia maior incidência de radiação solar durante o dia e maior perda de energia radiativa da superfície durante a noite.

Padrões sazonais de variabilidade da umidade relativa do ar apresentados na Figura 2c mostraram uma maior amplitude na variação entre as estações. Observa-se que no período que coincide com a estação seca a umidade relativa do ar foi menor. A média anual foi de 82% e o valor mínimo registrado foi de 25% na estação seca. A estação chuvosa apresentou média diária de 89% e a estação seca de 74%. As médias encontradas foram compatíveis com os valores encontrados por PRIANTE FILHO et al. (2004) para a região de floresta de transição Amazônia-Cerrado no sul da Amazônia.

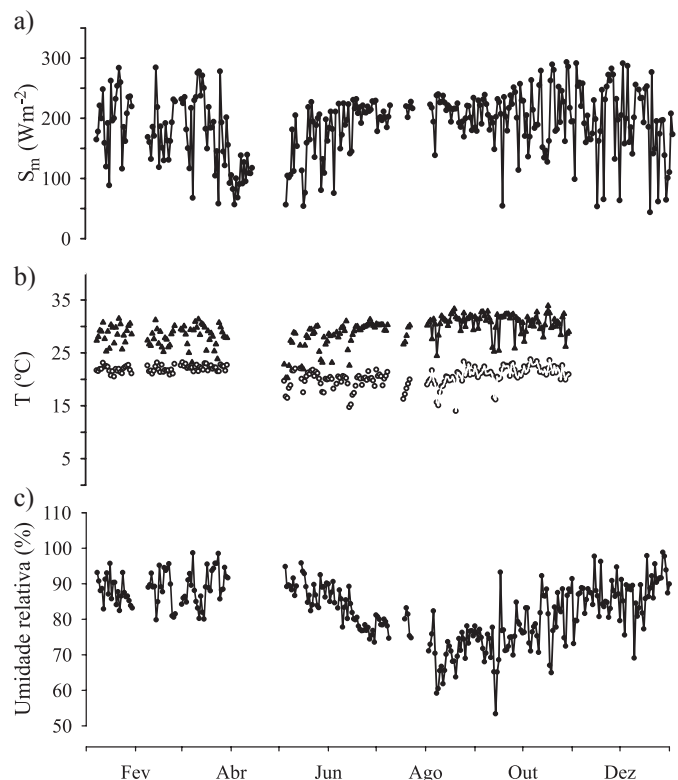


Figura 2 – Padrões sazonais dos valores médios diários da radiação solar incidente (a), mínimos (círculos) e máximos (triângulos) da temperatura do ar (b) e médios diários da umidade relativa do ar (c).

3.2. Fluxos de Calor Sensível e Latente

3.2.1. Balanço de Energia

O fechamento do balanço de energia apresentado na Figura 3 apresentou inclinação da reta de 0,93 e coeficiente de determinação igual a 0,88 ($n = 3828$). A inclinação encontrada, embora estatisticamente diferente de 1 (teste T de Student, $\alpha = 0,05$), foi condizente com os valores encontrados em diversos estudos realizados na Floresta Amazônica que utilizaram o método de covariância de vórtices turbulentos (por exemplo: 0,84 em ARAÚJO et al., 2002 e 0,86 em ROCHA et al., 2004).

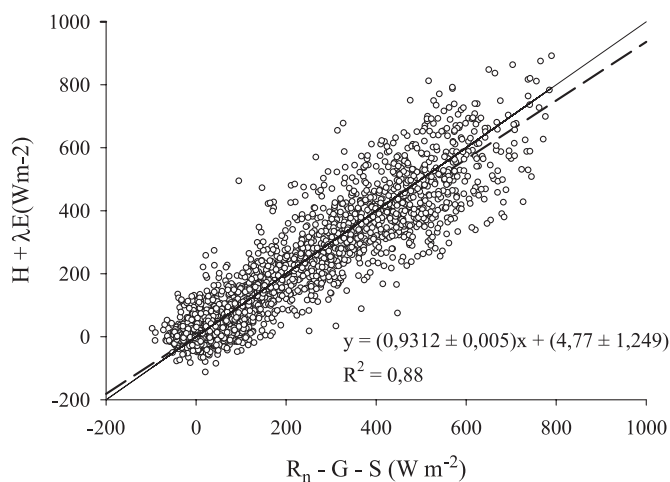


Figura 3 – Relação entre a energia disponível no sistema ($R_n - G - S$) e a soma dos fluxos de calor sensível e calor latente ($H + \lambda E$). R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo e S é a energia armazenada na biomassa e no dossel. Os valores representam médias horárias ($n = 3.828$).

VON RANDOW et al. (2004) encontraram um déficit de 26% no fechamento do balanço de energia para a mesma região no ano de 1999 quando a torre se encontrava na posição antiga. Ao traçar o gráfico com os dados de 1999 encontraram inclinação da reta de 0,74 e coeficiente de determinação igual a 0,89. Um dos fatores que os autores relataram como possíveis complicações para estimar os fluxos por meio do método de covariância de vórtices turbulentos, foi a possível ocorrência de circulações locais induzidas pelas diferenças entre a vegetação de floresta e as áreas desflorestadas próximas. Essas complicações podem ter levado a subestimação dos valores de fluxos medidos e, por conseguinte, à falta do fechamento do balanço na posição antiga.

3.2.2. Padrões de Variabilidade Sazonal e do Ciclo Diurno

As medidas do saldo de radiação apresentaram pequena variação sazonal como pode ser observado na Figura 4a. A estação chuvosa apresentou média diária de $134,3 \text{ W m}^{-2}$ e a seca de $131,6 \text{ W m}^{-2}$. ROCHA et al. (2004) encontraram maior variação do

saldo de radiação entre as estações, em uma área de floresta no leste da Amazônia (em Santarém, PA), com média de 140 W m^{-2} na estação seca e 113 W m^{-2} na chuvosa. O saldo de radiação (Figura 5a) teve uma variação máxima antes do meio-dia local e foi tipicamente negativo à noite. Esta variação apresentou mínimo de -33 W m^{-2} durante a noite e pico de 547 W m^{-2} na estação seca por volta das 12 horas.

O fluxo de calor latente apresentou maior amplitude na variação sazonal (Figura 4b) quando comparada com a amplitude encontrada no saldo de radiação. A estação chuvosa apresentou média diária de $115,5 \text{ W m}^{-2}$ e a seca de $92,9 \text{ W m}^{-2}$, indicando uma diminuição de 19,6% dos fluxos de calor latente na estação seca. O valor médio anual foi de $97,7 \text{ W m}^{-2}$. Os fluxos de calor latente apresentaram variabilidade do ciclo diurno com pico de 400 W m^{-2} às 13 horas e mínimo de $2,4 \text{ W m}^{-2}$ durante a noite (Figura 5b).

O fluxo de calor sensível teve variação sazonal inversa à variação do fluxo de calor latente, como pode ser observado na Figura 4c. A estação chuvosa apresentou média diária de $17,0 \text{ W m}^{-2}$ e a seca de $37,1 \text{ W m}^{-2}$, representando aumento de 118,2% dos fluxos de calor sensível na estação seca. O valor médio anual foi de $26,5 \text{ W m}^{-2}$. A média horária do fluxo de calor sensível (Figura 5c) variou predominantemente entre -9 e 169 W m^{-2} , sendo tipicamente negativo no período noturno.

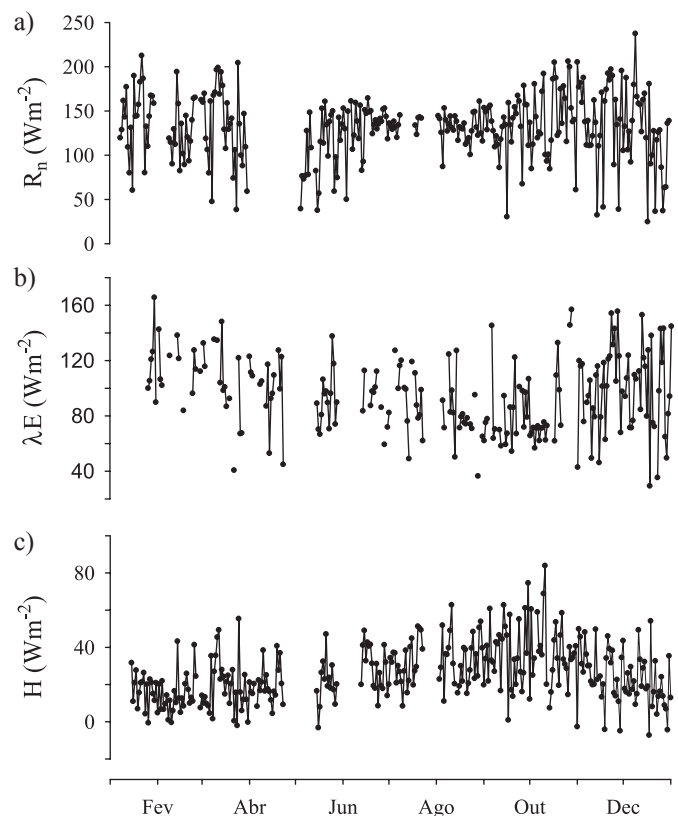


Figura 4 – Padrões sazonais dos valores médios diários do saldo de radiação (a), do fluxo de calor latente (b) e do fluxo de calor sensível (c).

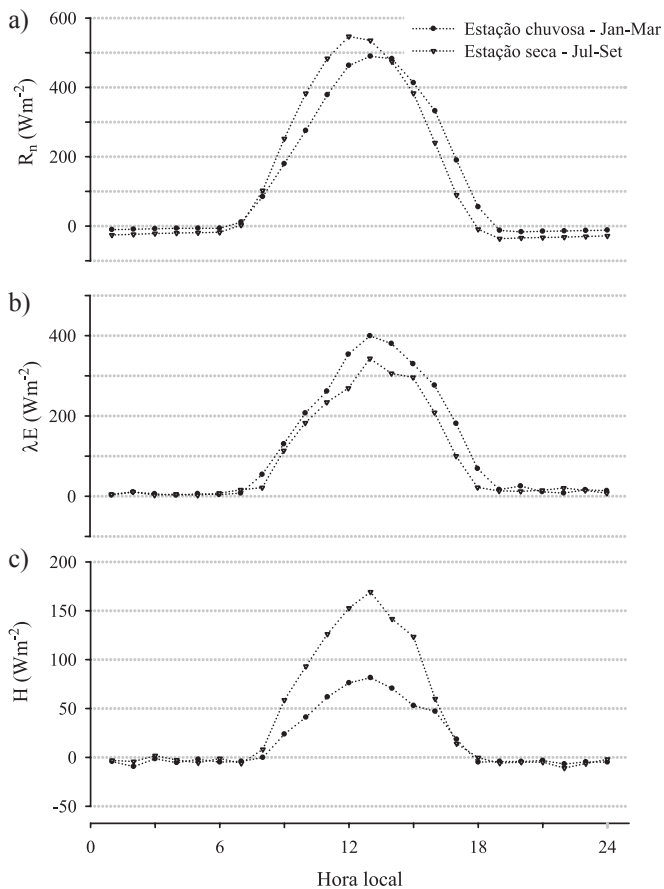


Figura 5 – Variação do ciclo diurno médio do saldo de radiação (a), do fluxo de calor latente (b) e do fluxo de calor sensível (c). Foram utilizados 78 dias nas medições da estação chuvosa para saldo de radiação e 77 para fluxos de calor latente e sensível. Na estação seca foram 77 dias para saldo de radiação e 84 dias para os fluxos de calor latente e sensível.

Durante o período de medidas o saldo de radiação não apresentou considerável variação sazonal, e cerca de 78% do saldo de radiação disponível foram gastos no processo de evapotranspiração. Na estação seca o índice foi de 71% e aumentou para 86% na estação chuvosa. Estes valores estão condizentes com valores encontrados por MALHI et al. (2002) em estudo feito na Amazônia Central. Os autores mencionaram que a evapotranspiração representou entre 75 e 85% do saldo de radiação na estação chuvosa, mas este índice declinou durante a estação seca.

Os resultados da Tabela 2 mostram uma resposta clara da vegetação à diminuição das chuvas na estação seca. Com a redução da precipitação a umidade do solo também diminuiu, principalmente nas camadas superiores do solo. Desta forma, é de se esperar uma diminuição nas taxas de evapotranspiração e um aumento nos fluxos de calor sensível.

Tabela 2 – Médias diárias do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor latente (λE) e fluxo de calor sensível (H) calculadas nas estações chuvosa e seca, e medidas da fração evaporativa ($\lambda E/R_n$). As unidades são $W m^{-2}$.

	R_n	λE	H	$\lambda E/R_n$
Estação chuvosa	134,3	115,5	17,0	0,86
Estação seca	131,6	92,9	37,1	0,71
Diferença (%)	-2,0	-19,6	+118,2	-

Em estudos anteriores, porém, observou-se que as árvores na Floresta Amazônica têm em geral uma boa adaptação a estas condições, desenvolvendo raízes bem profundas e atingindo o lençol freático nas camadas inferiores do solo. Desta forma, a floresta mantém altas taxas de evapotranspiração mesmo durante a estação seca e apresenta pouca variabilidade sazonal (ARAUJO et al., 2002; ROCHA et al., 2004). Até mesmo os dados da REBIO Jaru, na posição onde a torre se encontrava, não apresentaram uma variação tão clara, apesar de indicarem um pequeno aumento na razão entre o calor sensível e calor latente no final da estação seca (VON RANDOW et al., 2004).

Ao comparar os dados de 2004 com os da posição antiga da torre (Tabelas 3 e 4) observa-se que houve diminuição do saldo de radiação no ano de 2004. Também houve diminuição do fluxo de calor sensível nas duas estações e do fluxo de calor latente na estação seca. Entretanto houve aumento do fluxo de calor latente na estação chuvosa.

Tabela 3 – Valores médios da estação chuvosa de saldo de radiação (R_n), de calor latente (λE), de calor sensível (H) e da razão $\lambda E/R_n$. As unidades são $W m^{-2}$.

	R_n	λE	H	$\lambda E/R_n$
VON RANDOW et al. (2004)	136,1	104,5	31,6	0,77
Ano de 2004	134,3	115,5	17,0	0,86
Diferença (%)	-1,3	+10,5	-46,2	-

Tabela 4 – Valores médios da estação seca de saldo de radiação (R_n), de calor latente (λE), de calor sensível (H) e da razão $\lambda E/R_n$. As unidades são $W m^{-2}$.

	R_n	λE	H	$\lambda E/R_n$
VON RANDOW et al. (2004)	146,9	108,6	38,3	0,74
Ano de 2004	131,6	92,9	37,1	0,71
Diferença (%)	-10,4	-14,4	-3,1	-

A diminuição do fluxo de calor latente durante a estação seca, de $15,7 W m^{-2}$, é consistente com a diminuição do saldo de radiação, de $15,3 W m^{-2}$. Nota-se que o valor médio do fluxo de calor sensível nesta estação é praticamente igual ao valor

médio dos anos anteriores. Já na estação chuvosa, a diminuição do saldo de radiação foi pequena e o aumento do fluxo de calor latente, de 11 W m^{-2} , foi compensado pela diminuição do fluxo de calor sensível, de $14,6 \text{ W m}^{-2}$.

Os dados coletados na posição atual, situada a apenas 13 km ao sul da posição antiga, mostram maior resposta a estação seca na região: um aumento evidente no calor sensível, que chega a dobrar seus valores, e uma diminuição de mais de 19% na evapotranspiração.

3.3. Fluxos de Dióxido de Carbono

Os resultados do fluxo de CO_2 estão relacionados à troca líquida no ecossistema (NEE) ou produção líquida no ecossistema (NEP) (GRACE, 2004). Como indicativo da fotossíntese e da respiração foi utilizada a convenção meteorológica, na qual valores positivos indicam fluxos de carbono da vegetação para a atmosfera (respiração) e valores negativos indicam fluxos de carbono da atmosfera para a vegetação (fotossíntese).

3.3.1. Filtro u^*

A relação entre a velocidade de fricção do ar (u^*) noturna e a troca líquida de dióxido de carbono no ecossistema (NEE) mostrou que houve uma dependência do NEE em relação à velocidade de fricção do ar. Este comportamento pode ser observado até uma velocidade de fricção do ar de $0,30 \text{ m s}^{-1}$. Com a utilização do filtro u^* (onde foram descartados os fluxos de CO_2 quando $u^* \leq 0,30 \text{ m s}^{-1}$) obteve-se um descarte de 70% dos dados noturnos de fluxos de CO_2 . Esse resultado foi condizente com o que reportam ARAÚJO et al. (2002) e KRUIJT et al. (2004). Os autores mencionam que em diversos sítios da Amazônia, utilizar esse tipo de filtragem nos dados significa descartar até 80% dos dados noturnos.

Em consequência do descarte de uma grande proporção de dados noturnos é necessário utilizar uma forma de preenchimento dos mesmos, mas, MILLER et al. (2004) reportam que a magnitude da correção é proporcional à incerteza gerada pela utilização do filtro u^* . Em decorrência dessas incertezas o filtro u^* não foi aplicado nas análises do presente estudo.

3.3.2. Padrões de Variabilidade Sazonal e do Ciclo Diurno

Assim como ocorreu com a partição de energia, a magnitude dos fluxos de CO_2 apresentou variação sazonal. Na Figura 6b observa-se que o máximo de carbono absorvido ocorreu na estação chuvosa ($-23,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). O comportamento típico da concentração de CO_2 mostra um fluxo positivo durante a noite, quando as emissões do solo e a respiração combinam-se como uma fonte de CO_2 para a atmosfera e começa a decrescer logo após o nascer do sol quando o CO_2 atmosférico é absorvido

pela vegetação, e as reações fotoquímicas começam a ocorrer de maneira mais intensa.

Verificou-se que a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa possivelmente não foi fator limitante para os padrões de variabilidade sazonal do fluxo líquido de carbono. Mesmo tendo uma maior disponibilidade de energia durante a estação seca, com pico de $1466 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 6a), analisando as médias do ciclo diurno do fluxo líquido de carbono, observou-se que essas foram menores do que as encontradas na estação chuvosa. Provavelmente devido à diminuição das chuvas e a conseqüente redução da umidade no solo, as taxas de absorção de CO_2 na estação seca tenham sido menores.

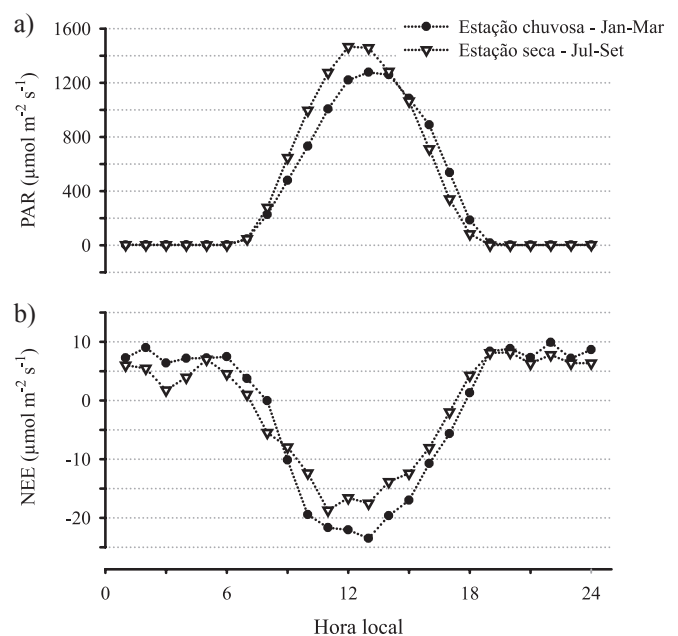


Figura 6 – Variação do ciclo diurno médio da radiação fotossinteticamente ativa (a) e do fluxo líquido de carbono (b). Foram utilizados 78 dias nas medições da estação chuvosa da PAR e 76 de NEE. Na estação seca foram utilizados 77 e 83 dias, respectivamente.

À noite, quando áreas com vegetação são fortes fontes de CO_2 por meio da respiração, as médias encontradas variaram entre 5 e $9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valores similares foram encontrados por ANDREAE et al. (2002) em três sítios na Amazônia. Os maiores valores noturnos de NEE no presente estudo ocorreram durante a estação chuvosa, a mesma tendência foi encontrada por MILLER et al. (2004).

Comparando os resultados de 2004 com os de anos anteriores publicados por VON RANDOW et al. (2004) que estão apresentados na Tabela 5, nota-se que houve aumento da absorção de dióxido de carbono pelo ecossistema da floresta em 2004, especialmente na estação seca. O aumento da absorção de CO_2 na estação seca não acompanhou a diminuição da evapotranspiração observada. O aumento da absorção líquida

de dióxido de carbono em 2004 parece estar associado com a diminuição da emissão de dióxido de carbono pelo solo e pela vegetação, a qual pode ser atribuída à menor disponibilidade de umidade nas camadas superficiais do solo (que estaria de acordo com a diminuição da taxa de evapotranspiração) ou com a menor quantidade de material orgânico morto neste novo sítio experimental, em comparação com o sítio antigo. Entretanto, não foram feitas medições que pudessem comprovar essa hipótese.

Tabela 5 – Valores médios das estações chuvosa e seca da troca líquida de dióxido de carbono no ecossistema (NEE) no período diurno (das 8 às 17 h) e noturno (das 19 às 5 h). As unidades são $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

	Estação Chuvosa		Estação Seca	
	diurno	noturno	diurno	noturno
VON RANDOW et al. (2004)	-14,4	+8,1	-10,5	+7,1
Ano de 2004	-15,0	+7,9	-11,5	+6,1
Diferença (%)	+4,2	-2,5	+9,5	-14,1

A integração dos dados de fluxos de CO_2 no ano provê uma estimativa anual da intensidade da absorção ou emissão. Fazendo a integração dos dados obteve-se uma absorção de CO_2 pelo ecossistema equivalente a $4,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Vários estudos que utilizaram o método de covariância de vórtices turbulentos sugeriram que $5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ são acumuladas em florestas de terra firme na Bacia Amazônica (GRACE & MALHI, 2002). Estes autores reportam que é uma quantidade surpreendentemente grande e, se essa alta taxa de acúmulo de carbono fosse aplicada a toda bacia, poder-se-ia concluir que a Amazônia é um gigantesco sorvedouro de carbono, talvez absorvendo dois terços das emissões por combustíveis fósseis do mundo. Os autores relatam ainda que esta visão é improvável e, além disso, não é consistente com análises de inventários biométricos ou estudos atmosféricos globais, que sugerem que a absorção na Amazônia é muito menor.

MILLER et al. (2004), em estudo realizado no leste da Amazônia, encontraram que a magnitude da integração anual foi altamente sensível ao tratamento de noites calmas quando o filtro foi usado para substituir NEE durante períodos noturnos com $u^* < 0,2 \text{ m s}^{-1}$. Análises da relação entre NEE noturno e u^* confirmaram que a soma anual precisou ser corrigida para o efeito das noites calmas. Antes da correção os autores haviam encontrado que a floresta aparentava ser um forte absorvedor do carbono da atmosfera ($-3,9 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), e após a correção os

resultados passaram a apresentar uma fonte líquida de carbono ($+0,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Mesmo esta estimativa tendo apresentado maior coerência com as medidas feitas por inventários biométricos, os autores concordam que o filtro u^* introduz incerteza na soma anual e que esta incerteza é proporcional à magnitude da correção.

De acordo com ANDREAE et al. (2002) o tamanho da absorção calculada é altamente sensível a suposições feitas nos cálculos, especialmente quando condições estáveis noturnas podem gerar perdas nos fluxos, ficando evidente que quando dados coletados sobre condições estáveis noturnas são substituídos por valores modelados (ou valores obtidos somente em condições noturnas com velocidade do vento relativamente alta), baixas estimativas de absorção são obtidas. Não existe ainda consenso científico se as correções são válidas e antes que isto seja resolvido, o fluxo anual permanece incerto.

4. CONCLUSÕES

Durante o ano de 2004, o saldo de radiação apresentou pequena variação sazonal, diferentemente dos fluxos de calor latente e sensível que apresentaram clara variação. As medidas de fluxo de calor latente indicaram redução de 19,6% na estação seca e as medidas de fluxo de calor sensível chegaram a dobrar seus valores na mesma estação.

Assim como ocorreu com a partição de energia, a magnitude dos fluxos de CO_2 apresentou variação sazonal e do ciclo diurno, apresentando tipicamente um fluxo positivo durante a noite e negativo durante o dia.

A integração dos dados de fluxos de CO_2 indicou uma absorção pelo ecossistema equivalente a $4,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, que não diferiu das taxas encontradas para a região Amazônica quando os fluxos são calculados pelo método de covariância dos vórtices turbulentos e não é aplicado o filtro de u^* .

De modo geral, na comparação dos fluxos de massa e energia entre os sítios experimentais antigo e atual verificou-se que o atual apresentou uma resposta mais clara à estação seca na região do que os resultados obtidos no antigo.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES, ao Projeto LBA e ao CNPq pelo suporte financeiro. A UNIR de Ji-Paraná pelo suporte logístico. Aos técnicos do IBAMA da sede da Rebio Jaru pelo suporte nas coletas e aos alunos bolsistas da UNIR – Ji-Paraná pela coleta e processamento dos dados. Renata Gonçalves Aguiar atualmente possui uma bolsa de pesquisa da Fundação Djalma Batista.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; BRANDÃO, C.; CARSWELL, F. E.; CICCIOLI, P.; COSTA, A. L.; CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; GASH, J. H. C.; GRACE, J.; KABAT, P.; LELIEVELD, J.; MALHI, Y.; MANZI, A. O.; MEIXNER, F. X.; NOBRE, A. D.; NOBRE, C.; RUIVO, M. L. P.; SILVA-DIAS, M. A.; STEFANI, P.; VALENTINI, R.; JOUANNE, J.; WATERLOO, M. J. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. **J. Geophys. Res.** v. 107, p. 33-1 – 33-25, 2002.
- ARAÚJO, A. C.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; RANDOW, C.; MANZI, A. O.; CULF, A. D.; GASH, J. H. C.; VALENTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **J. Geophys. Res.** v. 107, p. 58-1 – 58-20, 2002.
- AUBINET, M.; GRELE, A.; IBROM, A.; RANNIK, U.; MONCRIEFF, J.; FOKEN, T.; KOWALSKI, A. S.; MARTIN, P. H.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CLEMENT, R.; ELBERS, J.; GRANIER, A.; GRUNWALD, T.; MORGENSTERN, K.; PILEGAARD, K.; REBMANN, C.; SNIJDERS, W.; VALENTINI, R.; VESALAT. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forest: the EUROFLUX methodology. **Adv. Ecol. Res.** v. 30, p. 113-175, 2000.
- BALDOCHI, D. D.; VALENTINI, R.; RUNNING, S.; OECHELS, W.; DAHLMAN, R. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. **Glob. Change Biol.** v. 2, p. 159-168, 1996.
- CARSWELL, F. E.; COSTA, A. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, P. R.; RUIVO, M. L.; LEAL, L. S. M.; COSTA, J. M. N.; CLEMENT, R. J.; GRACE, J. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. **J. Geophys. Res.** v. 107, p. 43-1 - 43-16, 2002.
- CULF, A. D.; FISCH, G.; MALHI, Y.; COSTA, R. C.; NOBRE, A. D.; MARQUES FILHO, A. O.; GASH, J. H. C.; GRACE, J. Carbon dioxide measurements in the nocturnal boundary layer over Amazonian Forest. **Hydrology and Earth Systems Sciences.** v. 3, p. 39-53, 1999.
- ELBERS, J. A. **Eddy correlation system: user manual version 2.0.** Alterra, Wageningen, The Netherlands, 1998. 39 p.
- FALKOWSKI, P.; SCHOLLES, R. J.; BOYLE, E.; CANADELL, J.; CANFIELD, D.; ELSER, J.; GRUBER, N.; HIBBARD, K.; HÖGGER, P.; LINDER, S.; MACKENZIE, F. T.; MOORE III, B.; PEDERSEN, T.; ROSENTHAL, Y.; SEITZINGER, S.; SMETACEK, V.; STEFFEN, W. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. **Science.** v. 290, p. 291-296, 2000.
- FEARNSIDE, P. M. **A floresta amazônica nas mudanças globais.** Manaus: INPA, 2003. 134p.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; WRIGHT, I.; GASH, J. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. **Glob. Change Biol.** v.1, p. 1-12, 1995.
- GRACE, J. & MALHI, Y. Carbon dioxide goes with the flow. **Nature.** v. 416, p. 594-595, 2002.
- GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle. **J. Ecol.** 92, p. 189-202, 2004.
- HODNETT, M. G.; OYAMA, M. D.; TOMASELLA, J.; MARQUES FILHO, A. O. Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. In: **Amazonian deforestation and climate** (eds. J.H.C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts, R. L. Victoria). Chichester: John Wiley, 1996, p. 57-77.
- KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; VON RANDOW, C.; ARAÚJO, A. C.; OLIVEIRA, P. J.; CULF, A.; MANZI, A. O.; NOBRE, A. D.; KABAT, P.; MOORS, E. J. The robustness of eddy correlations fluxes for Amazon rain forest conditions. **Ecol. Appl.** v. 14, p. S101-S113, 2004.
- LEE, X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. **Agric. For. Meteorol.** v. 91, p. 39-49, 1998.
- MALHI, Y. & GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends Ecol. Evol.** v. 15, p. 332-337, 2000.
- MALHI, Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M. G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **J. Geophys. Res.** v. 107, p. 45-1 - 45-17, 2002.

- MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; MENTON, M. C.; ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. M. S.; SOUZA, C. A. D. Biometric and microeteorological measurements of tropical forest carbon balance. **Ecol. Appl.** v.14, p. S114-S126, 2004.
- MOORE, C. J. & FISCH, G. Estimating heat storage in Amazonian tropical forests. **Agric. For. Meteorol.** v. 38, p. 147-169, 1986.
- PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S., NOGUEIRA, J. S. de; CAMPELO JR, J. H., NUNES, P. C.; SANCHES, L.; COUTO, E. G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J. L.; MIRANDA, E. J.; PRIANTE, P. C.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M.S.; FRITZEN, C. L.; LACERDA, M.; SULI, G. S.; SHIRAIWA, S.; SILVEIRA, M.; VOURLITIS, G. L. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Glob. Change Biol.** v. 10, p. 863-876, 2004.
- RANNIK, Ü. & VESALA, T. Autoregressive filtering versus linear detrending in estimation of fluxes by the eddy covariance method. **Boundary-Layer Meteorol.** v. 91, p. 259-280, 1999.
- ROCHA, H. R.; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L. D. V. O.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. M. S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical Forest in eastern Amazonia. **Ecol. Appl.** v. 14, p. S22-S32, 2004.
- RUSTAD, L. Matter of time on the prairie. **Nature.** v. 413, p. 578-579, 2001.
- VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H. C.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. J.; CARDOSO, F. L.; KABAT, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theor. Appl. Climatol.** p. 1-22, 2004.
- WOHLFAHRT, G.; ANFANG, C.; BAHN, M.; HASLWANTER, A.; NEWSELY, C.; SCHMITT, M.; DRÖSLER, M.; PFADENHAUER, J.; CERNUSCA, A. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modeling. **Agric. Forest Meteorol.** v. 128, p. 141-162, 2005.