

FLUXOS DE CO₂ DO SOLO NA FLORESTA NACIONAL DE CAXIUANÃ, PARÁ, DURANTE O EXPERIMENTO ESECAFLOR/LBA

JOÃO DE ATHAYDES SILVA JÚNIOR¹, ANTONIO CARLOS LÔLA DA COSTA², PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO³, RAFAEL FERREIRA DA COSTA⁴, DANIEL B. METCALFE⁵, PAULO HENRIQUE LOPES GONÇALVES⁶, ALAN PANTOJA BRAGA⁷, YADVINDER S. MALHI⁸, LUIZ EDUARDO O. E. C. DE ARAGÃO⁹ E PATRICK MEIR¹⁰

¹Universidade Federal do Pará (UFPA), Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Belém, PA, Brasil.

²UFPA, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Belém, PA, Brasil.

³Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), CTRN/UACA, Campina Grande, PB, Brasil

⁴Universidade Federal Rural da Amazônia, Centro Integrado Universitário de Parauapebas, Parauapebas, PA, Brasil.

⁵Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Department of Forest Ecology and Management, Umeå, Sweden

⁶Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, Brasil.

⁷Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Brasília, DF, Brasil.

⁸University of Oxford, Centre for the Environment, Oxford, UK.

⁹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), OBT, São José dos Campos, SP, Brasil.

¹⁰University of Edinburgh, School of Geosciences, Institute of Geography, Edinburgh, UK.

athaydes@ymail.com, lola@ufpa.br, pvieira@dca.ufcg.edu.br, rfcosta@ymail.com, daniel.metcalfe@sek.slu.se, paulociclone@yahoo.com.br, alan_meteoro@yahoo.com.br, yadvinder.malhi@ouce.ox.ac.uk, leocaragao@gmail.com, pmeir@ed.ac.uk

Recebido Junho de 2011 - Aceito Setembro de 2012

RESUMO

O experimento ESECAFLOR/LBA foi conduzido na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará, e este artigo procura investigar os efeitos do estresse hídrico sobre a respiração do solo. Duas parcelas de 1 hectare foram instaladas em janeiro de 2002. Uma parcela (A) permaneceu em condições naturais e foi usada como controle, enquanto que na parcela de exclusão (B) foram instalados painéis plásticos para que aproximadamente 70% da precipitação fosse excluída. Os dados foram coletados mensalmente de janeiro a dezembro de 2005. Durante o ano de 2005 houve 2.211,6 mm de precipitação na ECFPn, ou seja 9,96% acima da média de 2.011,2 mm. As médias da umidade do solo foram de 15,6±9,2 e 9,5±3,4% nas parcelas A e B, respectivamente. As médias da temperatura do solo para as parcelas A e B foram de 25,6±0,4 e 25,7±0,5 °C, respectivamente. As médias dos fluxos de CO₂ no solo nas parcelas A e B foram de 3,46±0,44 e 3,21±0,84 μmolCO₂ m⁻²s⁻¹, respectivamente. Com a exclusão de parte da chuva na parcela B, houve uma redução de 7,23% nos fluxos de CO₂ no solo (0,25 μmolCO₂ m⁻²s⁻¹), 39,1% na umidade do solo (6,1p.p.), e um aumento de 0,39% na temperatura do solo (0,1°C). A umidade do solo na parcela B foi menor do que na parcela A, devido ao sistema de exclusão da chuva, no entanto no início do ano, devido a reformas que o mesmo passou esses valores estiveram próximos.

Palavras-Chave: Floresta amazônica, umidade do solo, temperatura do solo, respiração do solo.

ABSTRACT: SOIL CO₂ EFFLUX IN CAXIUANÃ NATIONAL FOREST, PARÁ, DURING THE ESECAFLOR/LBA EXPERIMENT

The ESECAFLOR/LBA experiment was carried out at the Caxiuanã National Forest, Pará State, and this article intends to investigate the effect of hydrological stress on the total soil respiration. Two adjacent 1 hectare plots were defined in January 2002. One plot remained in its natural conditions and was used as a control (A), while in the exclusion plot (B) plastic cover panels were installed in

order to drain about 70% of the total rainfall to outside of the plot. Accumulated monthly rainfall was recorded from 2005 January to December. During 2005 the rainfall over the ECFPn was 2,211.6 mm, or 9.96% above the mean of 2,011.2 mm. The average soil moisture was 15.6 ± 9.2 and $9.5 \pm 3.4\%$ in the plots A and B, respectively. The average soil temperature was 25.6 ± 0.4 and 25.7 ± 0.5 °C, for the A and B plots, respectively. The average soil CO₂ flux was 3.46 ± 0.44 and 3.21 ± 0.84 $\mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in the A and B plots, respectively. With the exclusion of part of rain in plot B, it had a reduction of 7.23% in the soil CO₂ flux ($0.25 \mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 39.1% in the soil humidity (6.1p.p.), and an increase of 0.39% in the soil temperature (0.1°C). The soil moisture in parcel B was lesser than in the parcel A, due to the exclusion system of rain. However at the beginning of the year, site B undergone some changes causing the measuring values to be about the same on both areas.

Keywords: Amazon rain forest, Soil moisture, Soil temperature, Soil respiration.

1. INTRODUÇÃO

É fato de que a composição da atmosfera e a quantidade de alguns de seus constituintes estão mudando rapidamente. As concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nítrico (NO_x), aumentaram consideravelmente do período pré-industrial até o presente. A concentração média de CO₂ aumentou de 280 ppm em meados do século XIX para 393,5 ppm em 2012. Esta tendência é atribuída principalmente às atividades humanas, como o uso de combustíveis fósseis, a industrialização, mudanças no uso da terra e a agricultura. Nos últimos 17 anos, a concentração de CO₂ na atmosfera aumentou mais de 30 ppm, e 75% desse aumento são representados pela utilização de combustíveis fósseis (IPCC, 2007; NOAA, 2012).

As medidas do fluxo de CO₂ na biosfera são de grande importância, devido o aumento das concentrações dos GEE na atmosfera e podem estar potencialmente relacionada com mudanças climáticas. As florestas, em particular, são importantes para o ciclo do carbono (C) por conterem acima e abaixo da superfície 80 e 40%, respectivamente, dos estoques terrestres globais de carbono (Dixon et al., 1994).

O fluxo de CO₂ oriundo do solo é a maior fonte de C para atmosfera na maioria dos ecossistemas terrestres, podendo representar de 60 a 90% da respiração total desses ecossistemas (Kuzyakov, 2006). A respiração do solo (Rs) é o principal caminho em que o C é liberado do solo (Sotta et al., 2006). O armazenamento global de C nos três primeiros metros da superfície é de 2.344 Pg C, o que é três vezes maior do que a quantidade de C existente na atmosfera e cinco vezes a quantidade de C armazenada na vegetação (Jobbagy e Jackson, 2000; Sotta et al., 2004), e o tempo de residência do C alocado na atmosfera é menor do que a da vegetação, que por sua vez é cinco vezes inferior ao tempo de residência no solo. Assim, um aumento ou diminuição de pequenas quantidades de carbono no solo pode gerar um impacto grande na concentração atmosférica de CO₂.

Alguns modelos de mudança climática globais sugerem reduções fortes na precipitação em algumas regiões tropicais,

particularmente na Amazônia durante o século XXI, associadas ao desmatamento e às mudanças no uso do solo que vêm ocorrendo na região (Foley et al., 1996; Cramer et al., 2001; Malhi et al., 2007; Costa et al., 2010). Como consequência da menor recirculação de água entre a biosfera desflorestada e a atmosfera, o clima da região amazônica pode tornar-se mais seco (Shukla et al., 1990; Nobre et al., 1991; Costa e Foley, 2000). As mudanças na precipitação podem afetar as emissões de CO₂ pelo solo: com a redução da água no solo, os agentes decompositores têm suas atividades reduzidas e a vegetação passa a investir em mudanças na morfologia do sistema radicular como uma estratégia adicional para aumentar a absorção de água e na redução da área específica das folhas para reduzir a perda de água. (Metcalf et al., 2008; 2010).

A Rs (respiração do solo) depende das atividades biológicas no solo, e da difusão do CO₂ pelos poros do solo, que podem ser influenciadas pelas propriedades do solo e pela vegetação. A respiração das raízes e dos microorganismos da rizosfera (componentes autotróficos) é a principal fonte de CO₂ no solo. A segunda fonte são as atividades microbianas e da microfauna (componentes heterotróficos) associadas com a decomposição da liteira acima e abaixo do solo (folhas, restos de galhos e raízes), e a mineralização da matéria orgânica do solo (Hanson et al., 2000).

A Rs é altamente variável, no tempo e no espaço, e em diferentes escalas. As variações temporais foram descritas em várias escalas de tempo, da diurna a anual (Subke et al., 2003; Scott et al., 2004). A variabilidade sazonal é explicada na maior parte pela variação da temperatura do solo (Ts) e do conteúdo de água no solo (CAS) (Buchmann, 2000).

O uso relativamente recente de métodos de medidas micrometeorológicas avançou significativamente a compreensão do processo do C no ecossistema, proporcionando a estimativa dos fluxos do CO₂, e a combinação de processos fotossintéticos e respiratórios (Moncrieff et al., 1997; Baldocchi e Wilson, 2001). Entretanto, apesar deste avanço, a medida da respiração total (noturna inclusive) continua incerta (Araújo et al., 2002),

e neste contexto, as medidas de componentes e escalas podem ajudar a confirmar o valor para a respiração total e estimativa da produtividade líquida do ecossistema (Meir e Grace, 2002).

Embora seja crescente a popularização da técnica de correlações de vórtices turbulentos para avaliar a produtividade primária líquida nos ecossistemas, os métodos clássicos para medidas de CO₂ no solo, com câmara e analisador infravermelho ou de armadilhas com alcalóide, permanecem como ferramentas úteis (Davidson et al., 2002; Baldocchi, 2003; Kuzyakov, 2006). Isso não é somente devido a algumas limitações da técnica de correlações de vórtices turbulentos, e a sua aquisição e instalação de elevados custos, mas em especial, porque os métodos das câmaras permitem que os fluxos de CO₂ sejam medidos diretamente no solo. As técnicas micrometeorológicas podem somente obter o fluxo de CO₂ total do ecossistema e não podem dividir o fluxo total em suas fontes individuais (Buchmann, 2002).

O presente estudo teve como objetivo investigar os fluxos de CO₂ oriundos do solo, com sistema de câmara fechada, para entendermos melhor contribuição do C do solo nesse ecossistema.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O sítio experimental fica situado na Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn), dentro da Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã, Pará, Brasil, (1° 43' 3,5" S; 51° 27' 36" W). A área é caracterizada por um relevo de planície, com temperatura média do ar anual igual a 25,7±0,8 °C, e precipitação média anual igual a 2.272±193 mm, e na estação seca, ocorre 555±116 mm de chuva. A área experimental está situada, aproximadamente, a 15 m acima do nível do Rio Curuá, onde, ocasionalmente, o lençol freático foi observado a 10 m de profundidade na estação chuvosa (Fisher et al., 2006). A floresta da região é classificada como de terra firme, com uma altura média do dossel igual a 35 m, e a biomassa acima do solo é de, aproximadamente, 200 m³ ha⁻¹ (Lisboa et al., 1997).

Pela classificação climática de Köppen, o clima é do tipo tropical quente e úmido e subtipo climático "Am" com uma curta estação seca, o número de horas de brilho de luz solar alcança mais de 2.100 horas ano⁻¹, a umidade relativa do ar média anual situa-se em torno de 80% e a predominância da direção do vento é de NE (Moraes et al., 1997; Oliveira, 2007).

O experimento ESECAFLOR (O Impacto da Seca Prolongada nos Fluxos de Água e Dióxido de Carbono em uma Floresta Tropical Amazônica), desenvolvido dentro da ECFPn foi implantado em janeiro de 2002, e constitui-se na simulação de um período de estiagem na floresta para avaliar o impacto prolongado da seca nos fluxos de água e CO₂ em floresta tropical amazônica, onde a estrutura física do Experimento

ESECAFLOR foram descritas por (Costa et. al., 2006; Ferreira da Costa et. al., 2007).

Os dados meteorológicos foram obtidos através de uma estação meteorológica automática instalada no topo da torre da parcela de exclusão, durante o período estudado. Os sensores que registraram os elementos meteorológicos estão a 40 m de altura acima do solo. Os dados foram registrados em intervalos de 2 minutos e medidos a uma taxa de amostragem de 1 observação a cada 10 segundos e armazenados em um datalogger CR23X (Campbell Sci, Inc., Logan, Utah) de janeiro a dezembro de 2005. A precipitação pluvial foi quantificada com pluviógrafo de balança modelo ARG 100 (Campbell Scientific, Inc.) com resolução de 0,204 mm. Também foi utilizada uma série de precipitação pluvial, com 28 anos de dados (1980-2007) registrada em uma estação pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA), situada na base administrativa do IBAMA dentro da FLONA de Caxiuanã, às margens do rio Caxiuanã, no município de Melgaço, PA (<http://www.ana.gov.br/>).

O CAS na camada superficial (0–300 mm) foi medido através do sensor CS616 Water Content Reflectometer (Campbell Sci. INC., Logan, Utah), conectado a um multímetro e os valores dos pulsos convertidos posteriormente para valores de umidade do solo (Us) através da Equação 1, conforme o manual do equipamento.

$$CAS(\%) = -0,0663 - 0,0063P + 0,0007P^2 \quad (1)$$

Onde, P é o sinal de saída emitido pelo sensor (ms), registrado com um multímetro digital.

A Us corresponde a umidade presente na porção do solo situada acima da superfície do lençol freático, incluindo o vapor d'água presente nos interstícios. A umidade é um fator importante, pois ajuda a regular as atividades dos organismos e a limitar a distribuição destes dentro de um ecossistema (Odum, 1988).

A temperatura do solo (T_s) foi medida a 100 mm de profundidade em todos os pontos por um termômetro digital (Testo 926, Testo Ltd., Hampshire, U.K.) introduzido no solo, próximo ao colar de PVC, durante as medidas de respiração do solo.

A R_s foi medida por um sistema de dinâmica fechada com um analisador de gás infravermelho portátil EGM-4 (PP Systems, Hitchin, UK), conectado a uma câmara de respiração do solo SRC-1 (PP Systems, Hitchin, UK), baseado na absorção da radiação na banda do infravermelho ($\lambda > 0,7\mu\text{m}$) pelo CO₂.

As medidas foram conduzidas mensalmente no período diurno, em 25 pontos distribuídos em cada parcela estudada, com duas repetições em cada ponto, no período de janeiro a dezembro de 2005. O fluxo devido à R_s é calculado com a taxa de variação de concentração de CO₂ dentro do volume de controle da câmara por unidade de tempo e área sobre a região

coberta pela câmara, utilizando a Equação 2.

$$R_s = \frac{\Delta C}{\Delta T} \cdot \frac{P}{1000} \cdot \frac{273}{t+273} \cdot \frac{44,01}{22,41} \cdot \frac{V_c}{A} \quad (2)$$

Onde, R_s é o fluxo de CO_2 do solo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); $\Delta C/\Delta T$ representa a variação do CO_2 dentro da câmara (ppm) por unidade de tempo (segundos); P é a pressão atmosférica (Pa); t é a temperatura do ar dentro da câmara ($^\circ\text{C}$); V_c é o volume total do interior da câmara (m^3), e A é a área do solo coberta pela câmara (m^2).

A câmara (100 X 150 mm) de diâmetro e altura, respectivamente foi ajustada para encaixar nos colares de PVC (100 X 50 mm). Em cada parcela foram instalados 25 colares permanentes no solo, enterrados a uma profundidade de 30 mm, um mês antes do início do experimento, para que o solo pudesse se estabilizar e minimizar os distúrbios dos colares no local. O uso de colares permanentes limita o distúrbio do solo e permite medidas repetidas na mesma posição durante o experimento. Com a inserção do colar, as raízes poderiam ser cortadas e diminuir a respiração da raiz, e conseqüentemente a R_s , mas o valor da perturbação depende da profundidade da inserção do colar e segundo Wang et al. (2005) a perturbação é, provavelmente, insignificante neste estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Precipitação pluvial

A Figura 1 apresenta os totais mensais da precipitação pluvial na Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn), no período de janeiro a dezembro de 2005, e as normais climatológicas do período de 28 anos (1980-2007) medidas na estação climatológica do IBAMA ambos dentro da FLONA de Caxiuanã, PA. Na ECFPn o maior total mensal de precipitação foi registrado em dezembro de 2005 (336,6 mm), representando 177% acima da média de 1980-2007 ($121,5 \pm 79,1$ mm), e o menor valor obtido (36,4 mm) foi em agosto de 2005, significando -41,0% da média ($61,7 \pm 33,3$ mm). Em valores relativos ao valor médio histórico, o mês de dezembro de 2005 na ECFPn registrou uma anomalia positiva de 136 mm, enquanto que no mês de junho de 2005 (84,4 mm) ocorreu a maior redução percentual com -56,2% em relação à média de 1980-2007 ($192,6 \pm 94,4$ mm), também caracterizando uma anomalia negativa de 13,8 mm. Há uma sazonalidade bem caracterizada da precipitação na ECFPn, estando o período chuvoso compreendido de dezembro a maio ($1.871,2$ mm, representando 84,6%), e o período seco entre junho e novembro (340,4 mm, representando 15,4%). Considerando a climatologia local (série de 28 anos dados coletados no IBAMA), os períodos chuvosos e secos representam 72,5 e 27,5%, respectivamente. As

precipitações na estação seca são causadas, principalmente, por nuvens convectivas isoladas (normalmente Cumulus), enquanto que na estação chuvosa ocorrem precipitações convectivas ao final da tarde (entre 17 e 18 horas), causadas por intensos sistemas convectivos e também por sistemas de grande escala como a zona de convergência inter-tropical (ZCIT) ao longo do dia (Molion, 1987; Fisch et al., 1996).

Na ECFPn, porém, no mês de setembro de 2005 (meio da estação seca) foram registrados 54,6 mm, que representaram 18,8% acima da média de 1980-2007, que é de 46,0 mm. No período de junho até agosto de 2005, houve uma redução de 50,9% na precipitação (185,8 mm) quando comparada com os 378,7 mm da série do IBAMA. Este evento está relacionado com a forte estiagem que houve na Amazônia, principalmente na parte oeste da região no segundo semestre de 2005 (Aragão et al., 2007; Marengo et al., 2007). O total precipitado no ano de 2005 foi de 2.211,6 mm na ECFPn, com média de 184,3 $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$, (9,96%) acima da média mensal de 167,6 mm registrada entre 1980-2007. No ano de 2005 ocorreu um total de chuvas de 2.007,3 mm contra uma média anual de 2.011,2 mm (base do IBAMA 1980-2007) o que representou uma redução de apenas 0,19% no ano, apesar da má distribuição mensal das chuvas observada em 2005.

3.2 Umidade do solo

A Figura 2 mostra as médias mensais da Us no período de janeiro a dezembro de 2005, durante o experimento ESECAFLOR na ECFPn dentro da FLONA de Caxiuanã, PA. A Us é diretamente afetada pela sazonalidade no regime das precipitações. No período analisado (janeiro a dezembro 2005), a Us na parcela de controle (A), variou de apenas $7,5 \pm 1,5\%$ em janeiro até $41,3 \pm 1,4\%$ em dezembro de 2005, variação esta ocorrida devido ao grande volume de precipitação ocorrido no mês de dezembro (336,6

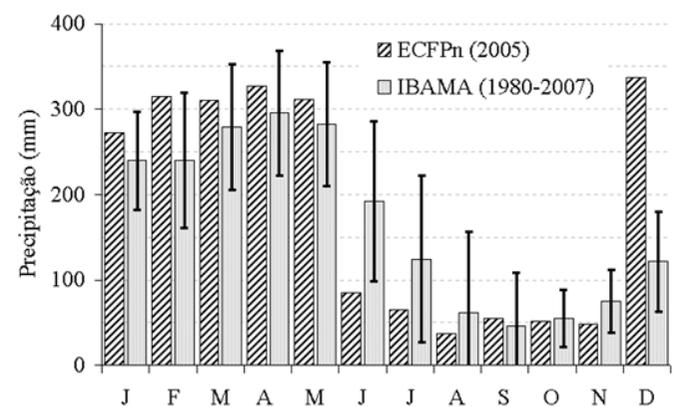


Figura 1 - Totais mensais da precipitação pluvial no ano de 2005 (ECFPn), e as médias mensais entre 1980-2007 (IBAMA) com os respectivos desvios-padrão, na FLONA de Caxiuanã, PA.

mm). Na parcela de exclusão (B), a variação foi de $6,7 \pm 0,9\%$ em janeiro até $16,4 \pm 4,5\%$ em maio de 2005. As médias da Us no período estudado foram de $15,6 \pm 9,2\%$ e $9,5 \pm 3,4\%$ para as parcelas A e B, respectivamente. Os coeficientes de variação (Cv) foram de 59% na parcela A, e 36% na parcela B, indicando que os valores de Us em ambas as parcelas foram heterogêneos. A semelhança dos valores da Us entre janeiro e abril é explicada por uma grande reforma que ocorreu na parcela B neste período, já que boa parte dos painéis e calhas que excluem a água da chuva estavam bastante danificados, findando sua recuperação no final de março para o início de abril.

3.3 Temperatura do solo

As flutuações médias mensais da temperatura do solo das parcelas A e B no ESECAFLOR dentro da FLONA de Caxiuanã, PA, no período de janeiro a dezembro de 2005 são mostradas na Figura 3. As médias da Ts nas parcelas A e B foram de $25,6 \pm 0,4$ e $25,7 \pm 0,5$ °C, respectivamente. O menor valor da Ts na parcela A foi registrado em julho de 2005 com valor de $25,1 \pm 0,3$ °C, e a máxima em fevereiro com $26,3 \pm 0,3$ °C. Na parcela B a menor Ts ocorreu no mês de julho de 2005 com $25,1 \pm 0,2$ °C, e o maior valor da Ts foi $26,7 \pm 1,5$ °C ocorrendo no mês de janeiro. As variações da Ts apresentadas são provenientes da abertura de clareiras devido a queda de árvores, permitindo assim, que a radiação solar atinja a superfície, principalmente na época chuvosa devido a fortes ventos oriundos dos sistemas convectivos.

3.4 Respiração do solo

Nos ecossistemas de maneira geral a respiração do solo (Rs) varia influenciada principalmente por oscilações na Ts e no conteúdo de água no solo (CAS), particularmente, nas florestas tropicais além da Ts e CAS, que têm papel fundamental na Rs,

existem outros fatores que influenciam neste processo, já que a Ts e CAS são relativamente constantes. A Rs é composta pelas respirações autotróficas (das raízes) e heterotróficas (microbiana e microfauna), relacionando a Rs com o ambiente subterrâneo (biomassa de raízes) e com as biomassas microbianas e microfaunianas do solo (Fang et al., 1998; Davidson et al., 2000; Adachi et al.; 2006).

As médias dos fluxos de CO₂ no solo nas parcelas A e B no período de janeiro a dezembro de 2005 no ESECAFLOR na FLONA de Caxiuanã, apresentadas na Figura 4, foram de $3,46 \pm 0,44$ e $3,21 \pm 0,84$ $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Sotta et al., (2004) encontraram um valor médio da Rs de $3,2 \pm 0,02$ $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, em uma área de floresta próxima de Manaus, AM, no período de maio a julho de 1997, próximo dos valores encontrados no presente estudo para o período de maio a julho de 2005, que foram de $3,54 \pm 0,42$ e $3,86 \pm 0,56$ $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, nas parcelas A e B, respectivamente.

Os valores máximos e mínimos da Rs na parcela A foram de $4,13 \pm 0,25$ $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ registrado em setembro, e $2,69 \pm 0,38$ $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em março de 2005, respectivamente.

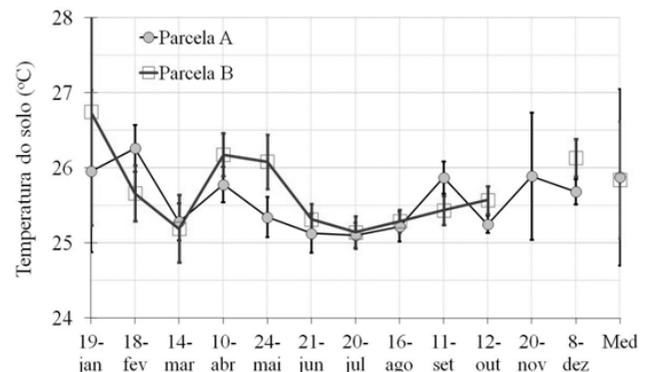


Figura 3 - Médias mensais da temperatura do solo no ano de 2005, nas parcelas do ESECAFLOR na FLONA de Caxiuanã, PA. Os símbolos à direita são as médias do período.

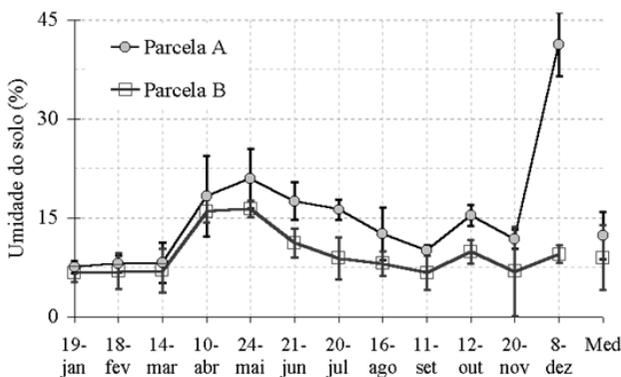


Figura 2 - Médias mensais da umidade do solo no ano de 2005, nas parcelas do ESECAFLOR na FLONA de Caxiuanã, PA. Os símbolos à direita são as médias do período.

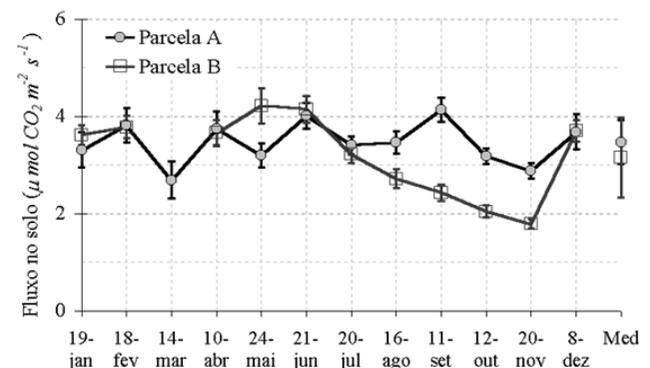


Figura 4 - Médias mensais dos fluxos de CO₂ no solo nas parcelas do ESECAFLOR na FLONA de Caxiuanã, PA no ano de 2005. Os símbolos à direita são as médias do período.

Na parcela B a menor R_s ocorreu no mês de novembro com $1,79 \pm 0,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e o valor máximo foi $4,22 \pm 0,37 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em maio de 2005.

Os coeficientes de variação (CV) para as parcelas A e B foram de 13,0 e 26,0%, respectivamente, mostrando que a variabilidade dos valores medidos em relação à média foram pequenos, e quanto menores forem os valores do CV, maior será a homogeneidade dos dados. No período de janeiro até junho de 2005 as variações dos fluxos de CO_2 nas parcelas experimentais foram semelhantes, este fato foi devido ao período em que a estrutura de exclusão da chuva na parcela B passava por uma reforma como mencionado anteriormente. Com o fechamento dos painéis no mês de março de 2005, a disponibilidade de água no solo foi reduzindo gradativamente implicando na redução dos fluxos de CO_2 do solo na parcela B.

3.5 Correlações entre os fluxos de CO_2 do solo e as precipitações pluviárias acumuladas

A Figura 5 apresenta as regressões polinomiais entre os fluxos de CO_2 no solo e as precipitações pluviárias acumuladas em períodos de 1, 3, 5 e 10 dias antes das leituras dos fluxos de CO_2 no solo nas parcelas A e B do ESECAFLOR, durante o período de janeiro a dezembro de 2005.

Foram registradas apenas cinco ocorrências de precipitação nos dias imediatamente anteriores às medidas de fluxo de CO_2 no solo ($P = 1$ dia). Isto proporcionou coeficientes de determinação de $R^2 = 0,02$ e $R^2 = 0,11$ nas parcelas A e B, respectivamente (Figura 5a).

Para as precipitações pluviárias acumuladas nos três dias consecutivamente anteriores às medidas de fluxo de CO_2 no solo foram registradas nove ocorrências. As regressões polinomiais calculadas com os dados das parcelas A e B produziram coeficientes de determinação de $R^2 = 0,02$ e $R^2 = 0,37$, respectivamente (Figura 5b), que representam fraca correlação na parcela A ($R = 14,1\%$) e moderada na parcela B ($R = 60,8\%$).

Quando foram consideradas as precipitações acumuladas nos cinco dias ($P = 5$ dias) consecutivos anteriores às medidas de fluxo de CO_2 no solo houve 11 registros, que permitiram regressões polinomiais, que geraram coeficientes de determinação de $R^2 = 0,02$ e $R^2 = 0,02$ nas parcelas A e B, respectivamente (Figura 5c), representando uma fraca correlação ($R = 14,1\%$) em ambas as parcelas. Os valores do coeficiente de determinação entre o fluxo de CO_2 do solo e as precipitações pluviárias anteriores as medidas ocorridas foram muito baixos, indicando uma influência insignificativa entre as chuvas ocorridas nas 24h, 72h e 120h anteriores às medidas. Este atraso deve estar associado ao tempo de resposta dos processos de respiração e de decomposição da matéria orgânica presente no solo em contato com a chuva, que é superior a estes intervalos.

As precipitações acumuladas nos dez dias ($P = 10$ dias) consecutivos anteriores às medidas de fluxo de CO_2 no solo somaram 12 registros, as regressões polinomiais produziram coeficientes de determinação de $R^2 = 0,15$ e $R^2 = 0,42$ nas parcelas A e B, respectivamente (Figura 5d), proporcionando correlações moderadas em ambas as parcelas ($R = 38,7\%$) na parcela A, e ($R = 64,8\%$) na parcela B.

As melhores correlações apresentadas para os períodos de dez dias anteriores às medidas de fluxos de CO_2 no solo sugerem que esse é o tempo suficiente para ativar e acelerar as atividades heterotróficas (microbianas e microfaunianas) realizadas na camada de liteira depositada na superfície do solo, visto que essas atividades são reduzidas em períodos com pouca umidade presente na matéria orgânica.

3.6 Correlações entre os fluxos de CO_2 do solo, a temperatura do solo (T_s), e a umidade do solo (U_s)

As regressões polinomiais entre os fluxos de CO_2 no solo e as temperaturas do solo (T_s) nas parcelas A e B geraram coeficientes de determinação de $R^2 = 0,09$ e $R^2 = 0,29$, respectivamente (Figura 6a), representando coeficientes de correlações de $R = 30,0$ e $R = 53,8\%$ em A e B, respectivamente. Isto significa que há correlações muito fracas entre a temperatura do solo e os fluxos de CO_2 no solo na parcela A, e correlações moderadas na parcela B entre os fluxos de CO_2 no solo e as T_s . Somente a baixa variabilidade da T_s durante todo o ano de 2005, medida nas parcelas do ESECAFLOR, pode explicar em parte a oscilação observada nas correlações em ambas as parcelas experimentais, visto que como não há grandes nem abruptas variações em T_s , as atividades microbianas e microfaunianas não sofrem alterações relevantes.

Os fluxos de CO_2 no solo e as umidades do solo (U_s) nas parcelas A e B do ESECAFLOR permitiram regressões polinomiais, que geraram coeficientes de determinação de $R^2 = 0,04$ e $R^2 = 0,26$ em A e B, respectivamente (Figura 6b). Isto produziu coeficientes de correlações de $R = 20,0$ na parcela A, e $R = 50,9\%$ em B. Indicando fraca correlação entre os fluxos de CO_2 no solo e as U_s na parcela A, e correlação moderada na parcela B. Como a U_s apresentou variações durante o ano, isto pode explicar a grande variabilidade nas correlações observada entre as parcelas A e B. As variações na U_s influenciam nas atividades microbianas e microfaunianas, que apresentam maiores intensidades sob condições úmidas do que em situação de estresse hídrico.

4. CONCLUSÕES

O impedimento da penetração da água da chuva no solo provocou uma pequena redução de 7,23% nos fluxos de CO_2 no

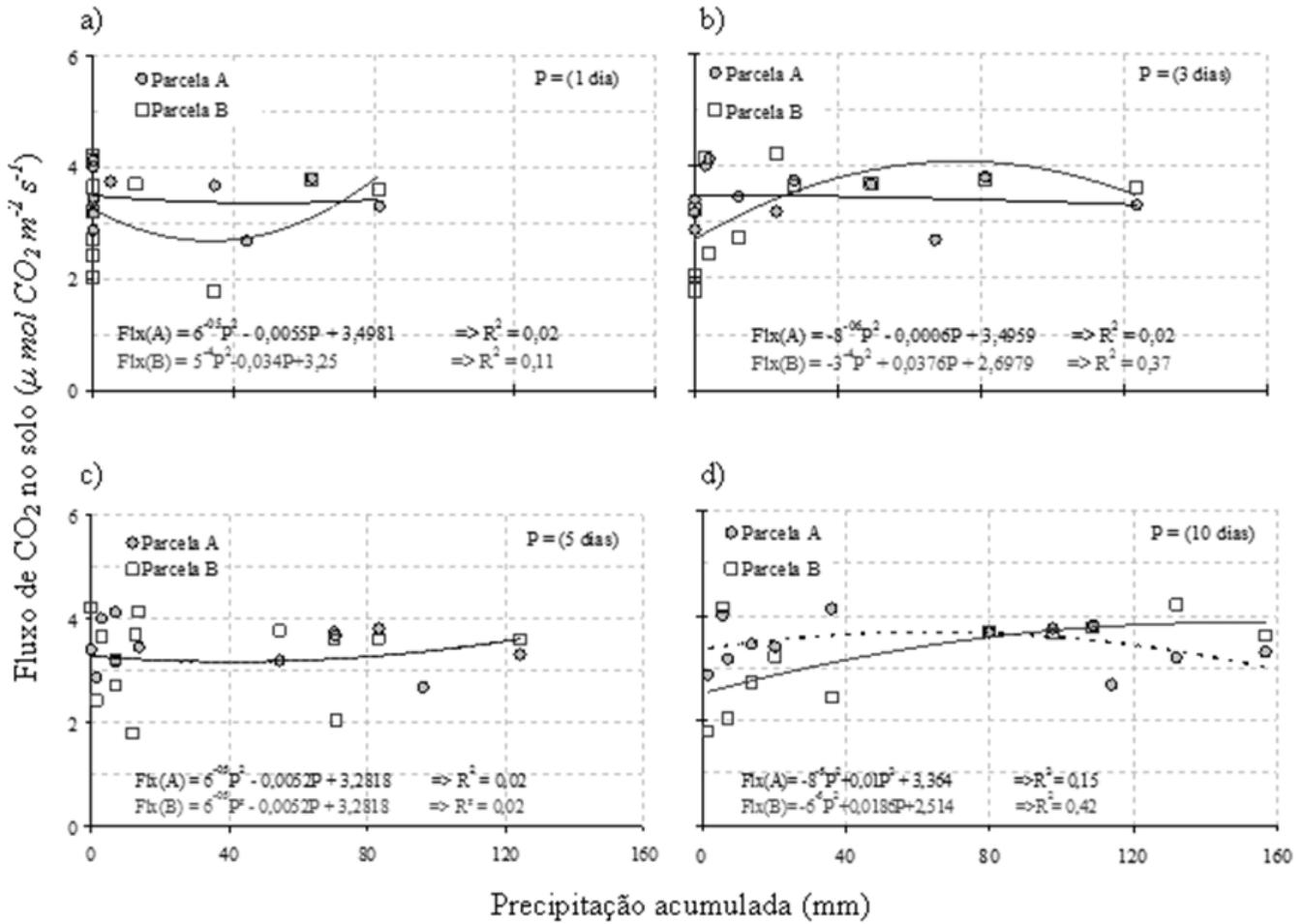


Figura 5 - Correlações entre os fluxos de CO₂ no solo e as precipitações pluviárias acumuladas em diferentes períodos, 1(a), 3(b), 5(c), e 10 dias(d) anteriores às medidas de fluxos de CO₂ no solo.

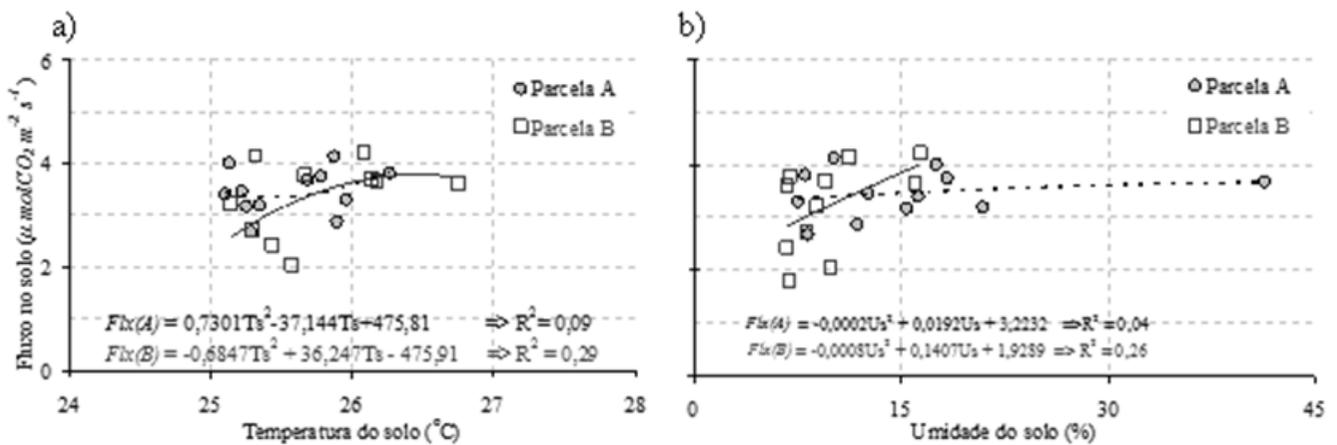


Figura 6 - Correlações entre os fluxos de CO₂ no solo com as temperaturas do solo (a), e as umidades do solo (Us) (b).

solo durante o ano de 2005, reduzindo de $3,46 \pm 0,44 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ na parcela A (controle) para $3,21 \pm 0,84 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, na parcela (B) sob exclusão de parte da chuva. Na época seca, na parcela B, o fluxo de CO_2 no solo foi em média $0,79 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ menor do que na parcela A, diferença esta devido a exclusão da água da chuva.

As médias da umidade do solo foram de $15,6 \pm 9,2$ e $9,5 \pm 3,4\%$ nas parcelas A e B, respectivamente, representando que houve redução $39,1\%$ na umidade do solo entre as parcelas.

As temperaturas do solo para as parcelas A e B foram, em média, de $25,6 \pm 0,4$ e $25,7 \pm 0,5$ °C, respectivamente, com um aumento insignificante de $0,1$ °C, ou apenas $0,39\%$ na temperatura do solo entre as parcelas do ESECAFLOR.

As precipitações pluviais acumuladas nos períodos de dez dias anteriores às medidas de fluxos de CO_2 no solo apresentaram melhores correlações, $R = 38,7\%$ na parcela A, e $R = 64,8\%$ na parcela B, que exerceram mais influências sobre os fluxos de CO_2 no solo quando comparadas com os períodos de; um dia ($R = 14,1\%$ em A, e $R = 33,1\%$ em B); três dias ($R = 14,1$ e $60,8\%$ em A e B, respectivamente), e com cinco dias ($R = 14,1$ em ambas as parcelas).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colegas de campo pela dedicação durante as coletas de dados, ao Projeto LBA pela bolsa que possibilitou participar da coleta desses dados e a CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADACHI, M.; BEKKU, S. Y.; RASHIDAH, W.; OKUDA, T.; KOIZUMI, H. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. **Applied Soil Ecology**, v. 34, p. 258 – 265, 2006.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R.M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letter**, v. 34, n. 7, 2007.
- ARAÚJO A. C. et al. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research – Atmospheres**, v. 107, Doi: 10, 1029/2001 Jd000676, 2002.
- BALDOCCHI D. D.; WILSON, K. B. Modeling CO_2 and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. **Ecological Modelling**, v. 142, p. 155–184, 2001.
- BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, p. 479-492, 2003.
- BUCHMANN, N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in picea abies stands. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n 11-12, p. 1625–1635, 2000.
- BUCHMANN, N. Plant ecophysiology and forest response to global change. **Tree Physiology**, v. 22, 1177-1184, 2002.
- COSTA, A. C. L.; BRAGA, A. P.; GONÇALVES, P. H. L.; COSTA, R. F.; SILVA JUNIOR, J. A.; MALHI, Y. S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MEIR, P. Estudos hidrometeorológicos em uma floresta tropical chuvosa na Amazônia – Projeto ESECAFLOR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, 71-78, 2006.
- COSTA, A. C. L.; GALBRAITH, D.; ALMEIDA, S.; PORTELA, B. T. T.; COSTA, M. C.; SILVA JUNIOR, J. A.; BRAGA, A. P.; GONÇALVES, P. H. L.; OLIVEIRA, A. A. R.; FISHER, R.; PHILLIPS, O. L.; METCALFE, D. B.; LEVY, P.; MEIR, P. Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest. **New Phytologist**, v.187: 579–591, 2010.
- COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO_2 concentrations, **Journal of Climate**, v. 13, p. 18 – 34, 2000.
- CRAMER, W.; BONDEAU, A.; WOODWARD, F. I.; PRENTICE, I. C.; BETTS, R.A.; BROVKIN, V.; COX, P. M.; FISHER, V.; FOLEY, J. A.; FRIEND, A. D.; KUCCHARIK, C.; LOMAS, M. R.; RAMANKUTTY, N.; SITCH, S.; SMITH, B.; WHITE, A.; YOUNG-MOLLING, C. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO_2 and climate change: results from six dynamic global vegetation models. **Global Change Biology**, v. 7, p. 357-373, 2001.
- DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L. V.; CATTÂNIO, J. H.; ACKERMAN, L. I.; CARVALHO, J. E. M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 53–69, 2000.
- DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; VERCHOT, L.V.; NAVARRO, R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 21-37, 2002.
- DIXON, R.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.; SOLOMON, A.; TREXLER, M.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, v. 263, p. 185–191, 1994.
- FANG, C.; MONCRIEFF, J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO_2 efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant Soil**, v. 205, p.135–146, 1998.
- FERREIRA DA COSTA, R.; SILVA, V. P. R.; RUIVO, M. L. P.; MEIR P.; COSTA, A. C. L.; MALHI, Y; BRAGA, A.P.; GONÇALVES, P. H. L.; SILVA JUNIOR, J. A.; GRACE, J.

- Transpiração em espécie de grande porte na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.2, p.180-189, 2007.
- FISCH, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C. A. Clima da Amazônia. Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática - Edição Comemorativa de 10 anos, Cap. 3, 1996.
- FISHER, R. A.; WILLIAMS, M.; DO VALE, R. L.; COSTA, A. C. L.; MEIR, P. Evidence from Amazonian forests is consistent with isohydric control of leaf water potential. **Plant Cell Environment**, v. 29, p. 151–165, 2006.
- FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p. 603-628, 1996.
- HANSON, P., EDWARDS, N., GARTEN, C., ANDREWS, J. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 115–146, 2000.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L. (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp, 2007.
- JOBAGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, p. 423-436, 2000.
- KUZ'YAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, p. 425-448, 2006.
- LISBOA, P. L. B.; SILVA, A. S. L.; ALMEIDA, S. S. Florística e estrutura dos ambientes. In: Lisboa P. L. B. (Ed). **Caxiuanã: Pesquisa e desenvolvimento sustentável CNPq/Museu Paraense Emílio Goeldi**, Belém, p. 163-193, 1997.
- MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. **Scienceexpress**, 10.1126/science.1146961, 2007.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C.; LABORBE, R.; ROCHA, R. P. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. **Relatório 5. Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade. Ministério do Meio Ambiente - MMA**, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio, São Paulo, SP, 77 p, 2007.
- MEIR, P., GRACE, J. Scaling relationships for woody tissue respiration in two tropical rain forests. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 963–973, 2002.
- DANIEL B. METCALFE, D. B.; MEIR, P.; ARAGÃO, L. E. O. C.; COSTA, A. C. L.; BRAGA, A. P.; GONÇALVES, P. H. L.; SILVA JUNIOR, J. A.; ALMEIDA, S. S.; DAWSON, L. A.; MALHI, Y.; WILLIAMS, M. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. **Plant Soil**, v. 311, p.189–199, 2008.
- METCALFE, D. B.; LOBO-DO-VALE, R.; CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; COSTA, A. C. L.; BRAGA, A. P.; GONÇALVES, P. H. L.; SILVA JUNIOR, J. A.; COSTA, M. C.; ALMEIDA, S. S.; CAMPBELL, C.; HURRY, V.; WILLIAMS, M.; MEIR, P. Impacts of experimentally imposed drought on leaf respiration and morphology in an Amazon rain forest. **Functional Ecology** v. 24, p.524–533, 2010.
- MOLION, L. C. B. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.2, p.107-117, 1987.
- MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; BRUIN, H.; ELBERS, D. J.; FRIBORG, T.; HEUSINKVELD, B.; KABAT, P.; SCOTT, S.; SOEGAARD, H.; VERHOEF, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, v. 188–189, p. 589–611, 1997.
- MORAES, J. C.; COSTA, J. P. R.; ROCHA, E. J. P.; SILVA, I. M. O. Estudos Hidrometeorológicos na Bacia do Rio Caxiuanã. In: Lisboa, P. L. B. (Org). **Caxiuanã Cnpq/Museu Paraense Emílio Goeldi**, Belém, p.85-95, 1997.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **Earth System Research Laboratory**. Disponível em <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>> Acesso em 07/04/2012.
- NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, p. 957-988, 1991.
- ODUM, E. P. **Ecologia**. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Editora Guanabara. 434p. 1988.
- OLIVEIRA, L. L. **Avaliação da interceptação da precipitação pela vegetação na floresta nacional de Caxiuanã, Pará**. 2007. 123 f. Dissertação em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, 2007.
- SCOTT, R. L.; EDWARDS, E. A.; SHUTTLEWORTH, W. J.; HUXMAN, T. E.; WATTS, C.; GOODRICH, D. C. Interannual and seasonal variation in fluxes of water and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p.65-84, 2004.

- SHUKLA, J.; NOBRE, C. A.; SELLERS, P. Amazon deforestation and climate change. **Science**, v. 247, p. 1322-1325, 1990.
- SOTTA, E. D.; MEIR, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, p. 601-617, 2004.
- SOTTA, E. D.; VELDKAMP, E.; GUIMARÃES, B.; PAIXÃO, R. K.; RUIVO, M. L. P. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 237, p. 57-64, 2006.
- SUBKE, J. A.; REICHSTEIN, M.; TENHUNEN, J. D. Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in southern Germany. **Soil Biol. & Biochemistry**, v.35, p.1467-1483, 2003.
- WANG, W. J., ZU, Y. G., WANG, H. M., HIRANO, T., TAKAGI, K., SASA, K., KOIKE, T. Effect of collar insertion on soil respiration in a larch forest measured with a Li-6400 soil CO₂ flux system. **Journal of Forest Research**, v. 10, p. 57-60, 2005.