

Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental

Carolina Melo da SILVA^{1,4*}, Steel Silva VASCONCELOS², Moisés MOURÃO JÚNIOR², Carlos José Capela BISPO³, Osvaldo Ryohei KATO², Alberto Cruz da SILVA JUNIOR⁴, Débora Cristina CASTELLANI³

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Rua Augusto Corrêa, 1, Belém, Pará, CEP 66075-110, Brasil.

² Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis, Tv. Dr. Enéas Pinheiro, s/no, Belém, Pará, CEP 66095-100, Brasil.

³ Natura Inovação e Tecnologias de Produtos Ltda, Cajamar, São Paulo, CEP 07750-000, Brasil.

⁴ Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus de Capitão Poço, Rodovia PA 124, km 0, Capitão Poço, Pará, CEP 68650-000, Brasil.

* Autor correspondente: cms.carol@yahoo.com.br

RESUMO

A dinâmica do efluxo de dióxido de carbono (CO₂) do solo e seus fatores controladores em sistemas agroflorestais da Amazônia são pouco compreendidas. O objetivo deste estudo foi avaliar a variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais onde a palma de óleo é a cultura principal e sua relação com fatores bióticos (carbono microbiano do solo, carbono total do solo, respiração microbiana do solo, raízes finas do solo, indivíduos componentes dos sistemas agroflorestais (SAFs)) e abióticos (umidade e temperatura do solo). As medições foram realizadas nos períodos menos chuvoso (dezembro de 2010) e chuvoso (maio de 2011). O efluxo de CO₂ do solo foi mais alto no período chuvoso, provavelmente, devido à maior atividade microbiana nesse período influenciada por fatores climáticos aliados a fatores bióticos. O efluxo de CO₂ do solo se correlacionou positivamente com umidade do solo e carbono da biomassa microbiana e negativamente com temperatura do solo e quociente metabólico, porém as correlações foram fracas. O efluxo de CO₂ do solo foi sensível ao tipo de sistema agroflorestal e a sazonalidade da precipitação.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito estufa, biomassa microbiana do solo, respiração do solo, umidade do solo, temperatura do solo.

Temporal variation of soil CO₂ efflux in oil palm-based agroforestry systems in eastern Amazon

ABSTRACT

The soil carbon dioxide (CO₂) efflux dynamics and its controlling factors of Amazonian agroforestry systems are poorly understood. The objective of this study was to evaluate the temporal variation of soil CO₂ efflux in oil palm-based agroforestry systems and the relation between efflux and biotic (microbial and total soil carbon, microbial respiration, fine roots, individual components of agroforestry systems (AFS)) and abiotic factors (soil moisture and temperature). The measurements were taken during the less rainy (December 2010) and rainy (May 2011) periods. The soil CO₂ efflux was highest during the rainy season, probably due to increased microbial activity influenced by climatic factors coupled with biotic factors. The soil CO₂ efflux correlated positively with soil moisture and microbial biomass carbon and negatively with soil temperature and metabolic quotient, but these correlations were weak. The soil CO₂ efflux was sensitive to the type of agroforestry system and to rainfall seasonality.

KEY-WORDS: Global warming, soil microbial biomass, soil moisture, soil respiration, soil temperature.

INTRODUÇÃO

O efluxo de dióxido de carbono (CO₂) do solo, também denominado de respiração do solo, resulta da respiração autotrófica e heterotrófica e corresponde ao principal fluxo de carbono de ecossistemas terrestres para a atmosfera (Ryan e Law 2005). Diversos fatores bióticos e abióticos controlam o efluxo de CO₂ do solo; geralmente a disponibilidade de água e a temperatura do solo são os principais controladores (Vincent *et al.* 2006). Na Amazônia, devido a pequena flutuação inter- e intra-anual da temperatura do solo, o conteúdo de água do solo representa o principal controlador da variação sazonal do efluxo de CO₂ do solo em floresta (Sotta *et al.* 2006).

Entre os fatores bióticos que controlam a respiração do solo, a composição de espécies vegetais pode ser um importante controlador do efluxo de CO₂ do solo, diretamente devido ao aporte de carbono no solo ou indiretamente por alterar o microclima. Por exemplo, o efluxo de CO₂ do solo em monocultivos pode ser menor do que em áreas com vários tipos de espécies devido a diferenças entre os sistemas em relação a biomassa acima do solo, acréscimo de carbono no solo e produção de raízes (Dias *et al.* 2010). Sistemas com copas maiores e com maior biomassa tendem a diminuir a temperatura e aumentam a umidade do solo, levando a redução da respiração do solo (Murphy *et al.* 2008).

Na Amazônia, sistemas agroflorestais têm sido recomendados como uma forma sustentável de uso da terra. A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) consiste em uma opção promissora para a composição de sistemas agroflorestais, pois auxilia na recuperação de áreas desmatadas, promove geração de emprego e renda e diversifica a produção, contribuindo para o desenvolvimento regional (Becker 2010). O objetivo deste estudo foi investigar a dinâmica temporal do efluxo de CO₂ do solo e sua relação com fatores bióticos e abióticos em dois sistemas agroflorestais com cultivos de palma de óleo.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Tomé-Açu, PA (02° 20' 59,68037" S, 48° 15' 36,06262" W). O experimento foi desenvolvido a 10 km de Quatro Bocas, distrito pertencente à Mesorregião do Nordeste Paraense e a Microrregião Tomé-Açu.

Anteriormente à instalação do experimento, a respectiva área de estudo era coberta por floresta secundária, com idade aproximada de 10 anos, formada depois de repetidos ciclos de corte e queima, para agricultura de subsistência (arroz – *Oryza sativa* L., mandioca – *Manihot esculenta* Crantz, milho – *Zea mays* L. e feijão-caupi – *Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Em setembro e outubro de 2007, aproximadamente seis hectares de floresta secundária foram derrubados e

triturados mecanicamente com um protótipo de triturador denominado de Tritucap (Rodrigues *et al.* 2007); nesta área foram implantados, em 2008, sistemas agroflorestais com baixa e alta diversidade de espécies plantadas, sendo que em ambos a palma de óleo (variedade Tenera) era a cultura chave (ver Santiago *et al.* 2013).

O SAF com baixa diversidade de espécies plantadas, instalado em 2 hectares triturados mecanicamente, consistiu de faixas de linhas duplas de palma de óleo (espaçadas de 7,5 m entre linhas e 9,0 m entre plantas) intercaladas com faixas de 15 m, em que foram plantados gliricídia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walf), feijão guandú (*Cajanus cajan* (L.) Huth), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.), ingá (*Inga edulis* Mart.) e margaridão (*Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray), com função de adubação verde.

O SAF com alta diversidade de espécies plantadas foi instalado em 4 ha, sendo 2 ha triturados mecanicamente e 2 ha triturados manualmente. Este SAF também consistiu de faixas de linhas duplas de palma de óleo intercaladas com faixas de 15 m, em que foram plantados feijão de porco (*Canavalia ensiformis*), feijão guandú (*Cajanus cajan*), crotalária (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* (Piper & Tracy)), margaridão, mandioca (*Manihot esculenta*), banana (*Musa spp* Musa L.), cacau (*Theobroma cacao* L.), açai (*Euterpe oleracea* Mart.), gliricídia, ingá, tachi branco (*Sclerolobium paniculatum* Vogel), guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess), ipê (*Tabebuia spp.* Gomes ex DC.) e bacaba (*Oenocarpus bacaba* Mart.).

Nos SAF com baixa e alta diversidade de espécies, foi delimitada uma área, em cada sistema, de 12 m x 12 m, dividida em 36 subáreas de 2 m x 2 m (Figura 1). A área delimitada no SAF com alta diversidade de espécies continha 48 indivíduos, resultando em densidade de 0,33 indivíduos m⁻², enquanto que a área delimitada no SAF com baixa diversidade de espécies apresentava 29 indivíduos, com densidade de 0,2 indivíduos m⁻².

Foi instalado um pluviômetro artesanal (Garcez e Mota 2010) próximo (2 km) à área de estudo para monitoramento da precipitação diária durante o período experimental (Figura 2). As medições e coletas de amostras foram realizadas em cada subárea (célula), duas vezes: uma em dezembro de 2010, final da estação menos chuvosa; e outra em maio de 2011, final da estação chuvosa. Em duas células em cada sistema havia um indivíduo de palma de óleo.

Foi realizado o inventário das espécies plantadas, registrando-se as coordenadas de cada indivíduo plantado, sua respectiva classificação como perenes ou anuais e seus valores de diâmetro a altura do peito (DAP), no caso das arbóreas; o DAP foi medido com uma fita métrica. Em cada subárea (célula), cada ponto de (a) medição de DAP e efluxo de CO₂ do solo e (b) coleta de amostras, cujas coordenadas também foram registradas, foi relacionado com a zona de influência

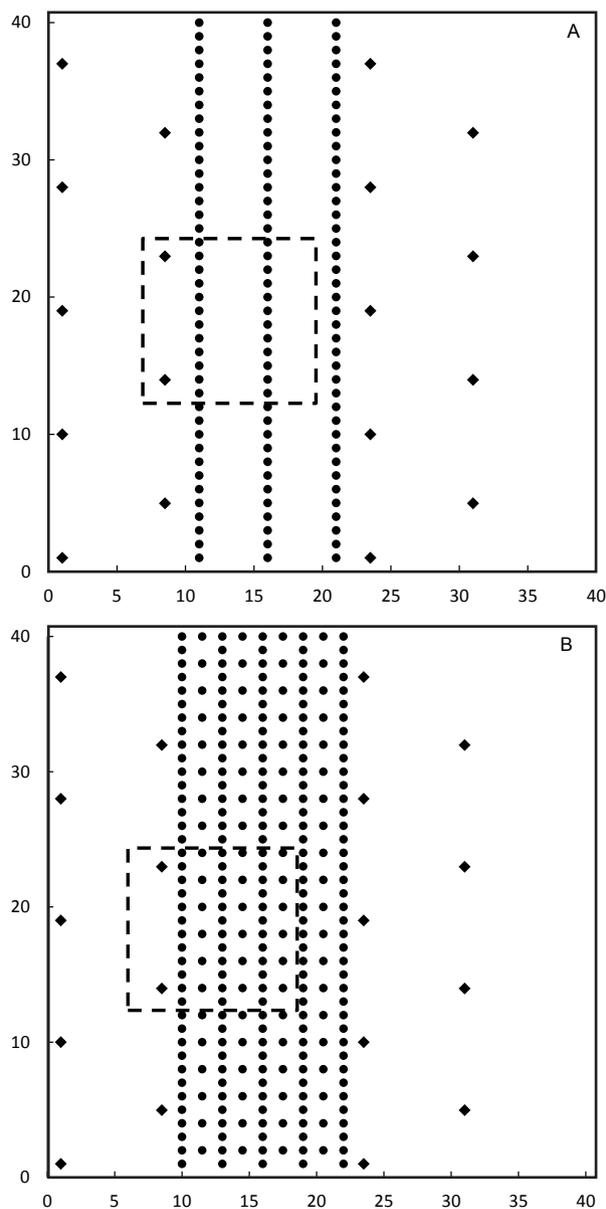


Figura 1. Croqui do arranjo das espécies plantadas nos sistemas agroflorestais com baixa (A) e alta diversidade de espécies plantadas (B). Os indivíduos de palma de óleo e de outras espécies estão representados por losangos e círculos, respectivamente. O retângulo representa a área de onde foram retiradas as amostras em cada sistema; os valores nos eixos "X" e "Y" correspondem à distância em metros.

dos indivíduos presentes naquela subárea. A zona de influência foi determinada pela área de uma circunferência de 0,5 m de raio ao redor de cada indivíduo, considerando-se sua base (coleta) como o centro da circunferência. Portanto, as zonas de influência foram divididas em quatro categorias: zona de influência das espécies perenes (PER); zona de influência das espécies anuais (ANU); zona de influência dos dois tipos de

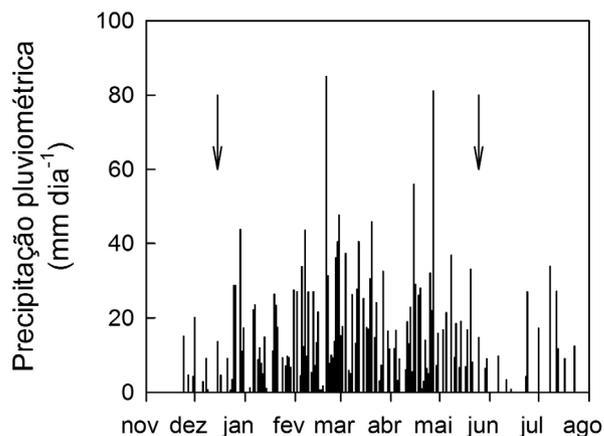


Figura 2. Precipitação pluviométrica diária na área de estudo. As setas indicam os dias de coleta no período menos chuvoso (dezembro 2010) e no período chuvoso (maio 2011).

espécies simultaneamente, perenes e anuais (PER+ANU); e as zonas que não sofrem influência de espécies, chamada de zona sem influência de espécies (SI). Os resultados de efluxo de CO₂ do solo e outras variáveis testadas (carbono da biomassa microbiana do solo, carbono total do solo, respiração microbiana do solo, raízes finas do solo, biomassa acima do solo, umidade e temperatura do solo) foram então relacionados com cada categoria de zona de influência.

Efluxo de CO₂ do solo

O efluxo de dióxido de carbono (CO₂) do solo foi medido com uma câmara de respiração do solo com volume de 1178 cm³ (SRC-1, PP Systems, Amesbury, Estados Unidos) acoplada a um analisador de CO₂ por infravermelho (EGM-4, PP Systems, Amesbury, Estados Unidos). Um termômetro acoplado ao equipamento mediu a temperatura do solo, a 10 cm de profundidade, no momento da medição do efluxo de CO₂, quando também foram registradas a temperatura e a umidade do ar com um psicrômetro (y-5014, Yoshino, Tóquio, Japão), instalado em local sombreado próximo à área de medição. As medições foram realizadas entre dezembro de 2010 e maio de 2011.

No centro de cada célula, foi instalado um anel de cloreto de polivinila (PVC) de 10 cm de diâmetro e 8,5 cm de altura, inserido cerca de 2 cm no solo. A primeira medição do efluxo de CO₂ do solo foi realizada uma semana depois da instalação dos anéis. Após a primeira coleta, os anéis foram reposicionados nas células, distante aproximadamente 80 cm do centro, em local definido por sorteio.

Em cada célula, foram coletadas amostras de solo a uma profundidade de 10 cm, distantes pelo menos 50 cm do anel, para determinação da umidade gravimétrica do solo (Embrapa 1997).

Coleta de solo

Em cada célula foram coletadas três amostras, com trado tipo copo. Uma amostra de solo com 196 cm³ (área de coleta = 19,6 cm², profundidade = 10 cm) foi coletada na área circunscrita pelo anel para determinação da quantidade de raízes no solo, logo após a medição do efluxo de CO₂ do solo. Duas amostras foram coletadas, na área ao redor (cerca de 50 cm) do anel, sendo que essas amostras foram misturadas imediatamente armazenadas sob refrigeração a 4°C até o processamento no laboratório para a determinação da respiração microbiana e carbono microbiano e total.

Raízes finas

Em laboratório, as amostras foram lavadas sobre duas peneiras, com aberturas de malha de 2 mm e 0,84 mm, nessa ordem. Após a lavagem, as raízes retidas na peneira de 0,84 mm foram colocadas em uma bandeja de plástico, com dimensões de 40 cm x 28 cm, com água. As raízes contidas em uma área equivalente a 25% da bandeja, escolhida aleatoriamente, foram separadas manualmente; a massa de raízes determinada na bandeja foi multiplicada por 4. As raízes retidas nas duas peneiras foram armazenadas em sacos de papel, os quais foram secos em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, por 48 horas, e pesados em balança com precisão de 0,0001 g.

Biomassa e atividade microbianas

Para determinação da respiração microbiana do solo, foi utilizado o método da incubação (Jenkinson e Powlson 1976). As amostras de solo foram peneiradas previamente em malha de 2 mm, e, em seguida, delas foram retirados resíduos visíveis de plantas e animais. Depois disso, as amostras foram mantidas no escuro, à temperatura ambiente, por sete dias, em frascos de vidro hermeticamente fechados, contendo um béquer com 25 mL de NaOH 0,5 M e outro béquer com 10 mL de água destilada. Em seguida, a solução de NaOH foi titulada com HCl 0,5 mol L⁻¹ na presença de BaCl₂.

O carbono da biomassa microbiana foi determinado pelo método da fumigação-extração (Jenkinson e Powlson 1976), em 20 g de amostras em duplicata. Após fumigação com clorofórmio (CHCl₃) isento de etanol durante 48 h, as amostras foram extraídas com 50 mL de K₂SO₄ 0,5 M, cujo pH foi ajustado entre 6,5 e 6,8, em agitador por 2 h. Em seguida, as amostras foram decantadas por 30 min e filtradas em papel filtro quantitativo. A determinação da concentração de C nos extratos fumigado e não-fumigado foi realizada por dicromatometria, a partir da retirada de uma alíquota de 8 mL do extrato, ao qual foram adicionados 2 mL de K₂Cr₂O₇ 0,066 M, 10 mL de H₂SO₄ e 5 mL de H₃PO₄. O mesmo processo de extração foi realizado para as amostras não-fumigadas. O Kc utilizado para o cálculo da biomassa microbiana foi 0,26.

O qCO₂ (quociente metabólico) foi calculado pela relação entre a respiração microbiana (RM) e o C da biomassa microbiana (BIOM-C) (Silva *et al.* 2007).

A concentração de carbono do solo foi determinada por combustão via seca usando-se analisador elementar (CNS-2000, LECO Corporation, Michigan, Estados Unidos). Antes da análise, as amostras de solo foram peneiradas a 60 mesh. O estoque de carbono foi calculado a partir dos dados de densidade do solo, determinada pelo método do anel volumétrico (Embrapa 1997), em que amostras indeformadas foram colocadas em estufa a 105 °C até atingir peso constante (para mais detalhes sobre a coleta de solo para densidade de solo ver Carvalho *et al.* 2014). Foram coletadas 5 amostras de solo em cada sistema; não foi realizada amostragem por célula, para esta variável. Os valores médios de densidade do solo e os respectivos desvios padrões foram: 1,20 ± 0,03 g cm⁻³ no SAF com baixa diversidade de espécies e 1,29 ± 0,04 g cm⁻³ no SAF com alta diversidade de espécies (Carvalho *et al.* 2014).

Análise estatística

As variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância (ANOVA, p<0,05) de três fatores (sistemas, períodos e zonas de influência). Foram considerados marginalmente significativos os valores de 0,05<p<0,055. As médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% com a utilização do programa Sisvar (Ferreira 2011). Foi realizada correlação de Pearson entre as variáveis com o programa SigmaStat 11. Foi determinado o coeficiente de variação (CV) com o objetivo de avaliar a homogeneidade das variáveis obtidas; quanto menor o valor do CV, mais homogêneos são os dados. Os valores de CV foram classificados como baixo (< 10%), médio (entre 10 e 20%), alto (entre 20 e 30%), muito alto (> de 30%) (Pimentel Gomes 1990).

RESULTADOS

O SAF com baixa diversidade de espécies apresentou as maiores médias de temperatura do solo nas quatro zonas de influência analisadas em comparação com as zonas de influência do SAF com alta diversidade de espécies. O SAF com baixa diversidade de espécies apresentou a maior média de temperatura do solo na zona de influência das espécies perenes+anuais, e as menores médias nas zonas de influência das espécies perenes e espécies anuais. No SAF com alta diversidade de espécies a temperatura do solo não variou significativamente entre as zonas de influência. A temperatura do solo foi significativamente mais alta no SAF com baixa diversidade de espécies (período menos chuvoso = 27,1 ± 0,1 °C e período chuvoso = 25,7 ± 0,1 °C; p<0,001) (Tabela 1) do que no SAF com alta diversidade de espécies (período menos chuvoso = 25,4 ± 0,1 °C e período chuvoso = 25,3 ± 0,1 °C; p<0,001). A temperatura do solo apresentou baixos valores de CV (0,09 a 0,45%).

Tabela 1. Valores de teste F e índices descritivos (valor P). ZINF - zona de influência das espécies; SIS*ZINF - interação entre sistemas e zona de influência das espécies; ZINF*Per - interação entre zona de influência das espécies e períodos; SIS*ZINF*Per – interação entre sistemas, zona de influência das espécies e períodos; CO₂ - efluxo de CO₂ do solo; TS - temperatura do solo; US - umidade do solo; RF - densidade de raízes finas; RM - respiração microbiana do solo; C_SOLO - carbono do solo; BIOM-C - carbono da biomassa microbiana; qCO₂ - quociente metabólico.

Variáveis	Sistemas		ZINF		Períodos		Sis*ZINF		Sis*Per		ZINF*Per		Sis*ZINF*Per	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
CO ₂	7,852	0,0059	0,415	0,7421	13,480	0,0004	0,430	0,7315	0,207	0,6498	0,153	0,928	0,389	0,7608
TS	195,08	< 0,001	1,236	0,2995	97,476	<0,001	4,811	0,0033	65,57	<0,001	1,463	0,228	0,341	1,0000
US	120,17	< 0,001	2,793	0,0430	400,39	<0,001	1,05	1,0000	8,886	0,0034	0,490	0,689	0,544	0,6532
RF	3,259	0,0734	1,265	0,2892	3,776	0,0542	0,709	0,5485	2,712	0,1021	0,623	0,601	0,036	1,0000
RM	1,641	0,2025	3,035	0,0316	5,627	0,0192	1,190	0,3161	20,26	0,001	0,689	0,560	1,614	0,1894
C_SOLO	17,912	< 0,001	2,246	0,0861	0,221	0,6393	0,450	0,7179	6,406	0,0126	0,689	0,560	0,167	0,9186
BIOM-C	4,580	0,0342	3,432	0,0191	58,332	<0,001	5,987	0,0007	0,003	0,9577	1,800	0,150	2,262	0,0844
qCO ₂	6,486	0,012	0,820	0,485	34,816	<0,001	1,055	0,371	0,494	0,483	0,370	0,775	1,496	0,219

A umidade do solo foi maior no período chuvoso (SAF com baixa diversidade de espécies = 22,7 ± 0,6% e SAF com alta diversidade de espécies = 27,1 ± 0,6%) do que no menos chuvoso (SAF com baixa diversidade de espécies = 9,9 ± 0,6% e SAF com alta diversidade de espécies = 17,7 ± 0,6%); todas essas médias (Tabela 2) foram diferentes estatisticamente entre períodos e entre sistemas. O SAF com alta diversidade de espécies apresentou maior umidade do solo (22,4 ± 0,4%) do que o SAF com baixa diversidade de espécies (16,3 ± 0,4%) nos dois períodos analisados.

O estoque de carbono do solo não variou entre os sistemas no período menos chuvoso; no período chuvoso, o SAF com alta diversidade de espécies apresentou maior estoque de carbono (31,1 ± 1,5 Mg ha⁻¹) do que o SAF com baixa diversidade de espécies (21,1 ± 1,5 Mg ha⁻¹). No SAF com baixa diversidade de espécies, o estoque carbono foi mais alto no período menos chuvoso (25,5 ± 1,5 Mg ha⁻¹) do que no chuvoso (21,1 ± 1,5 Mg ha⁻¹); no SAF com alta diversidade de espécies não houve diferença entre os períodos analisados. O coeficiente de variação do carbono do solo variou de 17,9 a 25,6% (Tabela 3).

Houve efeito marginalmente significativo de período sobre o estoque de raízes finas, cujos valores foram maiores (aproximadamente 20%) no período menos chuvoso (1,2 mg cm⁻³) do que no chuvoso (0,96 mg cm⁻³). A densidade de raízes finas do solo apresentou valores muito altos de CV (42,4 a 62,8%).

O carbono da biomassa microbiana foi maior no período chuvoso (655 ± 30 mg C kg⁻¹) do que no período menos chuvoso (327 ± 30 mg C kg⁻¹). O C da biomassa microbiana no SAF com alta diversidade de espécies foi maior (750 ± 66 mg C kg⁻¹) do que no SAF com baixa diversidade de espécies, na zona de influência das espécies perenes+anuais. Não houve diferença entre as zonas de influência no SAF com baixa diversidade de espécies em relação ao carbono da biomassa microbiana. No SAF com alta diversidade de espécies, a maior média de carbono da biomassa microbiana foi encontrada na zona de influência das espécies perenes+anuais e as menores médias foram observadas na zona sem influência (374 ± 0,4 mg C kg⁻¹) e na zona de influência das espécies perenes (492 ± 0,4 mg C kg⁻¹), enquanto que a média de carbono da biomassa microbiana na zona de influência das espécies anuais foi igual estatisticamente a das demais áreas (543 ± 0,4 mg C kg⁻¹) (Figura 3).

A respiração microbiana do solo foi maior no período menos chuvoso no SAF com alta diversidade de espécies (1,81 ± 0,15 mg de C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹) do que no SAF com baixa diversidade de espécies (1,33 ± 0,15 mg de C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹) e, no período chuvoso, o SAF com baixa diversidade de espécies apresentou média maior (1,64 ± 0,15 mg de C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹) do que o SAF com alta diversidade de espécies (0,8 ± 0,15 mg de C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹). A respiração microbiana não variou significativamente entre os períodos no SAF com baixa diversidade de espécies; no SAF com alta diversidade de espécies a maior média ocorreu no período menos chuvoso.

Tabela 2. Valores médios das variáveis analisadas nos sistemas agroflorestais com alta e baixa diversidade de espécies contendo palma de óleo nos períodos menos chuvoso e chuvoso. CO₂ - efluxo de CO₂ do solo; TS - temperatura do solo; US - umidade do Solo; RF - densidade de raízes finas; RM - respiração microbiana do solo; C_SOLO - carbono do solo; BIOM-C - carbono da biomassa microbiana; qCO₂ - quociente metabólico.

Tipo de Sistema Agroflorestal	CO ₂						TS						US					
	Menos Chuvoso		Chuvoso		Média		Menos Chuvoso		Chuvoso		Média		Menos Chuvoso		Chuvoso		Média	
SAF alta div.	0,64 ¹ (0,07) ²	Aa	0,9 (0,07)	Aa	0,78 (0,05)	A	25,4 (0,1)	Aa	25,3 (0,1)	Aa	25,33 (0,05)	A	17,67 (0,6)	Aa	27,1 (0,6)	Ab	22,4 (0,4)	A
SAF baixa div.	0,48 (0,07)	Aa	0,7 (0,07)	Aa	0,59 (0,05)	B	27,1 (0,1)	Ba	25,7 (0,1)	Bb	26,4 (0,05)	B	9,9 (0,6)	Ba	22,7 (0,6)	Bb	16,31 (0,4)	B
Média	0,56 (0,05)	a	0,81 (0,05)	b			26,24 (0,05)	a	25,48 (0,05)	b			13,81 (0,4)	a	24,92 (0,4)	b		
	RF						RM						C_SOLO					
	Menos Chuvoso		Chuvoso		Média		Menos Chuvoso		Chuvoso		Média		Menos Chuvoso		Chuvoso		Média	
SAF alta div.	1,41 (0,12)	Aa	0,9 (0,12)	Ab	1,19 (0,09)	A	1,81 (0,15)	Aa	0,8 (0,15)	Ab	1,3 (0,01)	A	28,04 (1,47)	Aa	31,07 (1,47)	Aa	29,55 (1,04)	A
SAF baixa div.	0,99 (0,012)	Ba	0,95 (0,97)	Ba	0,97 (0,09)	A	1,33 (0,15)	Ba	1,64 (0,15)	Ba	1,5 (0,01)	A	25,53 (1,47)	Aa	21,11 (1,47)	Ba	23,32 (1,04)	B
Média	1,2 (0,09)	a	0,96 (0,09)	a			1,2 (0,1)	a	1,57 (0,1)	a			26,78 (1,04)	a	26,09 (1,04)	b		
	BIOM-C						qCO ₂											
	Menos Chuvoso		Chuvoso		Média		Menos Chuvoso		Chuvoso		Média							
SAF alta div.	373,971 (43,02)	Aa	700,27 (43,02)	Ab	537,12 (30,42)	A	4,78 (0,5)	Aa	1,15 (0,6)	Aa	3,0 (0,4)	A						
SAF baixa div.	373,971 (43,02)	Aa	610,48 (43,02)	Ab	445,05 (30,42)	B	5,8 (0,5)	Aa	2,94 (0,5)	Aa	4,4 (0,4)	B						
Média	327 (30)	a	655 (30)	b			5,29 (0,4)	a	2,05 (0,4)	b								

¹ Média (erro padrão), n = 72. Letras maiúsculas comparam médias entre sistemas e letras minúsculas comparam médias entre períodos de acordo com o teste Tukey (P < 0,05).

Tabela 3. Coeficiente de variação (CV %) de variáveis bióticas e abióticas em sistemas agroflorestais com baixa e alta diversidade de espécies plantadas durante os períodos chuvoso e menos chuvoso. CO₂ - efluxo de CO₂ do solo; TS - temperatura do solo; US - umidade do solo; RF - densidade de raízes finas; RM - respiração microbiana do solo; C_SOLO - carbono do solo; BIOM-C - carbono da biomassa microbiana; qCO₂ - quociente metabólico.

SAF com baixa diversidade de espécies	Período		SAF com alta diversidade de espécies	Período	
	Menos Chuvoso	Chuvoso		Menos Chuvoso	Chuvoso
	CV (%)			CV (%)	
CO ₂	15	26	CO ₂	29	53
TS	0,45	0,42	TS	0,14	0,09
US	15	11,14	US	12,74	12,45
RF	62,83	42,2	RF	45,97	47,14
RM	41,12	42,54	RM	28,98	59,09
C_SOLO	26,6	18,47	C_Solo	17,93	25,55
BIOM-C	41,57	17,44	BIOM-C	23,93	22,9
qCO ₂	55	43,01	qCO ₂	34	49

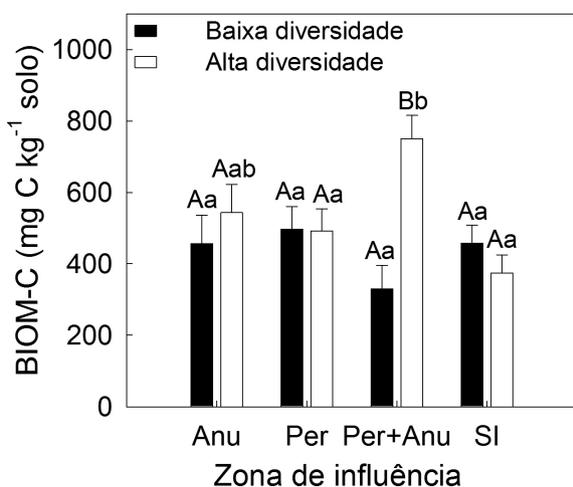


Figura 3. Carbono da biomassa microbiana do solo (BIOM-C) em função da zona de influência de espécies anuais (Anu), perenes (Per), anuais+perenes (Anu+Per) e sem influência das espécies (SI), em sistemas agroflorestais com alta e baixa diversidade de espécies plantadas. Dados são média \pm erro padrão (n = 72). Médias com letras diferentes diferem significativamente pelo teste Tukey (P < 0,05); letras maiúsculas indicam diferença entre sistemas e minúsculas entre zonas de influência.

O CV da respiração microbiana do solo variou de 29,0 a 59,1%. A respiração microbiana encontrada na zona de influência das espécies anuais ($1,86 \pm 0,15$ mg C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹) foi maior do que a respiração encontrada na zona de espécies perenes ($1,19 \pm 0,15$ mg de C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹); a respiração microbiana na zona sem influência de espécies ($1,31 \pm 0,15$ mg C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹) e das espécies perenes+anuais ($1,41 \pm 0,15$ mg C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹) foi igual estatisticamente as outras áreas.

O efluxo de CO₂, quociente metabólico e carbono da biomassa microbiana do solo variaram entre períodos. No período chuvoso, o efluxo de CO₂ do solo (média \pm erro padrão: $0,81 \pm 0,05$ g CO₂ m⁻²h⁻¹) foi maior do que no período menos chuvoso ($0,56 \pm 0,05$ g CO₂ m⁻²h⁻¹). Houve diferença significativa no efluxo de CO₂ do solo entre sistemas, mas não houve diferença significativa entre as zonas de influência das espécies (Tabela 1). O efluxo de CO₂ do solo foi maior no SAF com alta diversidade de espécies ($0,78 \pm 0,05$ g CO₂ m⁻² h⁻¹) do que no SAF com baixa diversidade de espécies ($0,59 \pm 0,05$ g CO₂ m⁻² h⁻¹). O efluxo de CO₂ do solo apresentou valores de coeficiente de variação (CV) variando de 15% no SAF com baixa diversidade de espécies em dezembro a 53% no SAF com alta diversidade de espécies em maio (Tabela 3).

O quociente metabólico foi mais alto no período menos chuvoso ($5,29 \pm 0,4$ mg C-CO₂ g⁻¹BMS-C h⁻¹) do que no período chuvoso ($2,05 \pm 0,4$ mg C-CO₂ g⁻¹BMS-C h⁻¹). O quociente metabólico foi mais alto no SAF com baixa

diversidade de espécies ($4,4 \pm 0,4$ mg C-CO₂ g⁻¹BMS-C h⁻¹) do que no SAF com alta diversidade de espécies ($3,0 \pm 0,4$ mg C-CO₂ g⁻¹BMS-C h⁻¹).

O efluxo de CO₂ do solo teve correlação significativa com umidade e temperatura do solo, carbono da biomassa microbiana e quociente metabólico (Tabela 4). A relação entre o efluxo de CO₂ do solo e a umidade e temperatura do solo são mostrados na Figura 4.

DISCUSSÃO

Os valores de efluxo de CO₂ do solo encontrados neste trabalho são compatíveis com os valores relatados (0,5 a 1,6 g CO₂ m⁻² h⁻¹) em sítios de floresta tropical na Amazônia (Sotta *et al.* 2006; Zanchi *et al.* 2009) e na Tailândia (Adachi *et al.* 2009). O maior efluxo de CO₂ do solo foi verificado no período chuvoso ($0,81 \pm 0,05$ g CO₂ m⁻²h⁻¹), provavelmente, devido à maior influência dos fatores climáticos favoráveis nesse período (maior umidade do solo e menor temperatura do solo). De acordo com Zanchi *et al.* (2009), a maior taxa de respiração do solo observada na estação chuvosa na região amazônica, provavelmente, deve-se ao aumento da produtividade neste período, o que pode afetar positivamente a respiração das raízes e os microorganismos do solo, que encontram condições favoráveis para a decomposição da matéria orgânica no período chuvoso; o que contribui para isso é a serrapilheira que se acumulou durante a estação seca sobre o solo e o aumento da umidade do solo durante o período chuvoso.

O SAF com alta diversidade de espécies apresentou maior efluxo de CO₂ do solo do que o SAF com baixa diversidade de espécies, provavelmente devido à maior atividade biológica no solo no sistema que apresentou maior carbono da biomassa microbiana e maior estoque de carbono (SAF com alta diversidade de espécies), uma provável explicação para isso é o fato desse sistema apresentar maior diversidade e quantidade de indivíduos. De acordo com Dias *et al.* (2010), os valores de efluxo de CO₂ do solo em monocultivos são menores do que em cultivos com mistura de várias espécies. A riqueza de espécies afeta o efluxo de CO₂ do solo por meio de mudanças em biomassa, que é maior nos sistemas com maior número de espécies, consequentemente levando a um aumento do efluxo de CO₂ do solo (Dias *et al.* 2010).

O fato de não ter sido encontrada relação entre a densidade de raízes finas e efluxo de CO₂ do solo nos SAF's com alta e baixa diversidade de espécies analisados pode ser devido a forma como foi feita a análise, que levou em consideração a zona de influência das espécies dentro de um raio de um metro a partir do tronco das árvores, independente da diferença entre as espécies. Sotta *et al.* (2004) analisaram o efluxo de CO₂ do solo em área de floresta tropical na Amazônia e não encontraram relação entre a biomassa acima do solo e o efluxo

Tabela 4. Correlação de Pearson entre as variáveis analisadas (Índice de significância, p-valor <0,05) nos períodos menos chuvoso e chuvoso. CO₂- efluxo de CO₂ do solo; TS - temperatura do solo; US - umidade do Solo; RF - densidade de raízes finas; RM - respiração microbiana do solo; C_SOLO - carbono do solo; BIOM-C - carbono da biomassa microbiana; qCO₂ - quociente metabólico.

Variáveis	TS	US	RF	RM	C_SOLO	BIOM-C	qCO ₂
CO ₂	-0,26 (0,003)	0,32 (0,0001)	0,03 (0,7)	-0,07 (0,4)	0,006 (0,9)	0,29 (0,001)	- 0,2 (0,01)
TS		-0,65 (0,0001)	-----	-0,1(0,22)	-0,1(0,24)	-0,55 (0,00001)	0,31(0,0004)
US			-0,005 (0,6)	-0,03 (0,7)	0,23 (0,01)	0,72 (0,0001)	-0,43 (0,0001)
RF				-0,02 (0,8)	0,1 (0,2)	-0,06 (0,5)	0,07 (0,4)
RM					0,03 (0,7)	-0,07 (0,4)	0,65 (0,0001)
C_SOLO						0,03 (0,8)	0,01 (0,9)
BIOM_C							-0,55 (0,0001)

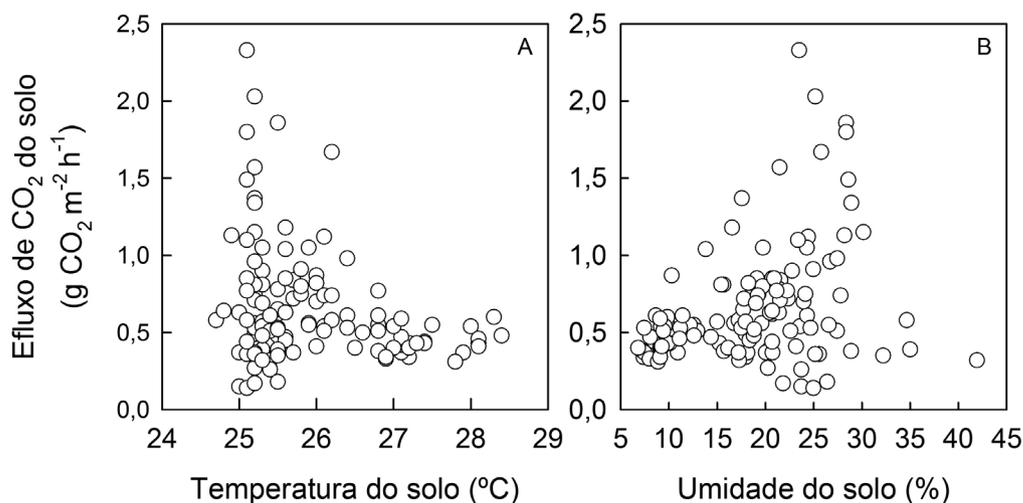


Figura 4. Relação entre o efluxo de CO₂ do solo e temperatura (A) e umidade do solo (B) em sistemas agroflorestais com palma de óleo.

de CO₂ do solo, e sugeriram duas explicações para isso (1) o fato da distribuição de raízes e de serrapilheira ser muito heterogênea; e (2) o crescimento de raízes ser influenciado por características do solo e a deposição de serrapilheira pela posição e forma da copa das árvores, ao invés da posição do tronco, que é o fator que foi levado em consideração nas medições realizadas por Sotta *et al.* (2004).

Os valores de coeficiente de variação do efluxo de CO₂ do solo relatados nesse trabalho (15 a 52%) estão de acordo com os valores obtidos por Sotta *et al.* (2006) (13 a 52%) em floresta madura na Amazônia e por Adachi *et al.* (2009) (53,1% no período chuvoso e 51,1 % no período menos chuvoso) em área de floresta tropical na Tailândia. Um fator que pode explicar essa variabilidade alta do efluxo de CO₂ do

solo verificada nos SAFs analisados em Tomé-Açu é a diferença na composição das espécies vegetais, que, por sua vez, exibem diferenças em relação a quantidade de raízes, biomassa vegetal deixada sobre o solo e composição da biomassa microbiana.

Outras variáveis analisadas

Os valores de umidade do solo neste trabalho são compatíveis com os valores encontrados por Santiago *et al.* (2013) na mesma área experimental deste artigo e por Sotta *et al.* (2006) em áreas de floresta em Caxiuanã, Pará. O sistema com maior diversidade e quantidade de espécies, SAF com alta diversidade de espécies, apresentou as maiores médias de umidade do solo nos dois períodos (chuvoso e menos chuvoso), sugerindo que a densidade de indivíduos que compõem os SAF influencia na dinâmica de água do solo

nessa área. O sistema com maior diversidade e quantidade de espécies apresentou os maiores valores de efluxo de CO₂, umidade, estoque de carbono, comunidade microbiana e o menor valor de quociente metabólico. De acordo com Pezarico *et al.* (2013), a maior diversidade de espécies contribui de forma significativa para a melhoria da qualidade do solo quando se comparam sistemas com maior e menor diversidade de espécies. Portanto, sistemas pouco diversificados podem reduzir a qualidade ambiental.

Foram encontradas pequenas diferenças na temperatura do solo entre os períodos menos chuvoso e chuvoso, o que está de acordo com outros trabalhos desenvolvidos na região amazônica (Sotta *et al.* 2004; Sotta *et al.* 2007; Zanchi *et al.* 2009). A temperatura do solo somente diferiu significativamente entre períodos no SAF com baixa diversidade de espécies, provavelmente, devido à menor quantidade de indivíduos do solo nesse sistema. O menor número de indivíduos no SAF com baixa diversidade de espécies pode levar à menor estabilidade da temperatura do solo, pois o solo mais exposto absorve maior parcela de radiação incidente em comparação com sistemas que tem maior número de indivíduos e, geralmente, maior cobertura vegetal (Sampaio *et al.* 2007). A cobertura vegetal, embora aumente a transpiração, contribui para a retenção da água do solo, reduz a evaporação e mantém temperaturas mais amenas do solo e do ar (Oliveira *et al.* 2005).

Os valores de carbono da biomassa microbiana estão de acordo com os encontrados por Smith *et al.* (2012.) em uma cronosequência de plantios de palma de óleo na Malásia e por Simões *et al.* (2010), em um plantio de acácia em área de cerrado, Roraima. O carbono da biomassa foi maior no período chuvoso do que no período menos chuvoso. De acordo com Gama-Rodrigues *et al.* (2005), o aumento do carbono da biomassa no período chuvoso pode estar associado à elevação da disponibilidade de nutrientes nesse período em decorrência da maior decomposição da matéria orgânica.

Foi observada maior densidade de raízes finas no período menos chuvoso, provavelmente resultante de uma estratégia de resistência das plantas ao déficit hídrico no período menos chuvoso (Vasconcelos e Dinardo-Miranda 2011). A deficiência de água pode promover maior alocação da fotossíntese para o crescimento radicular, resultando em plantas com maior crescimento radicular e maior capacidade de absorver água e minerais (Kozłowski e Pallardy 2002).

O quociente metabólico do solo foi mais afetado pela variação sazonal do que pelos sistemas agroflorestais, sendo maior no período menos chuvoso do que no período chuvoso. No entanto, esperava-se um menor valor de quociente metabólico na estação menos chuvosa, o que indicaria maior eficiência da biomassa microbiana em imobilizar carbono e nutrientes (Rangel-Vasconcelos *et al.* 2005).

Possivelmente as condições de menor umidade do período menos chuvoso, que variou entre 44 e 64% dos valores do período chuvoso, desencadearam uma situação de estresse nos sistemas agroflorestais avaliados. Segundo Diniz *et al.* (2014), elevados valores de qCO₂ podem indicar situações de estresse no ambiente. O quociente metabólico indica a eficiência dos microrganismos em utilizar substrato para a sua atividade (qCO₂) e em incorporar o C a sua biomassa. À medida que determinada população microbiana se torna mais eficiente, menos C é perdido como CO₂ pela respiração e maior proporção de C é incorporada ao tecido microbiano (Gama-Rodrigues *et al.* 2005).

O maior valor de respiração microbiana foi encontrado na época chuvosa no SAF com menor diversidade de espécies, sugerindo que a atividade microbiana foi estimulada pelo aumento da umidade do solo. De acordo com Luizão *et al.* (1992), a alta produção de CO₂ em solos da Amazônia no período chuvoso sugere que a atividade microbiana é estimulada pelo aumento da disponibilidade de água. O SAF com alta diversidade de espécies apresentou padrão diferente em relação à respiração microbiana do solo, sendo menor no período chuvoso, o que pode ser explicado pela maior umidade do solo nesse período, que pode ter influenciado na difusividade de gases no solo. Isso pode ocorrer devido à diminuição da oxigenação do solo e a modificação da difusão dos gases dentro do solo, que dificulta a respiração do solo quando a umidade do solo se torna maior do que um valor crítico (Sotta *et al.* 2004; Sotta *et al.* 2006).

Correlação entre as variáveis

O efluxo de CO₂ do solo apresentou correlação significativa positiva com a umidade do solo e negativa com a temperatura do solo, o que está de acordo com os resultados de Sotta *et al.* (2006). Embora o efluxo de CO₂ do solo seja afetado pela disponibilidade de água no solo, a umidade do solo só tende a ter forte influência na taxa de efluxo abaixo ou acima de valores extremos críticos de umidade do solo. A sazonalidade da chuva na região nos períodos de coleta dos dados (no período chuvoso houve um aumento de 12 % de chuva em relação ao período menos chuvoso) não foi suficientemente grande para afetar o efluxo de CO₂ do solo, como observado em outras regiões da Amazônia (Pinto-Junior *et al.* 2009).

As variáveis bióticas raízes finas e respiração microbiana do solo não apresentaram correlação significativa com o efluxo de CO₂, provavelmente por se tratar de uma área jovem, com apenas três anos de idade no período de coleta. Em sistemas jovens, a ocupação do solo pelas raízes finas ainda é localizada e, conseqüentemente, os impactos sobre carbono do solo e respiração microbiana ainda são pequenos, tendendo a aumentar a medida que o sistema amadurece, quando a ocupação do solo e da parte

aérea é mais homogênea. Por exemplo, Smith *et al.* (2012) observaram aumento da quantidade de raízes em plantios mais velhos (34 anos) de palma de óleo em relação aos mais novos (11 anos) e Almeida *et al.* (2010) relataram aumento do estoque de carbono do solo de acordo com o aumento da idade de plantios de teca (*Tectona grandis*) no Mato Grosso.

O carbono da biomassa microbiana apresentou fraca correlação positiva com o efluxo de CO₂ do solo, embora essa relação talvez fique mais forte durante o desenvolvimento do sistema. De fato, Haron *et al.* (1998) encontraram uma tendência de aumento da biomassa microbiana com o aumento da idade de plantio de palma de óleo na Malásia.

De acordo com D'Andrea *et al.* (2010), as emissões de CO₂ do solo são de natureza complexa, não sendo possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que, isoladamente, explique sua variação no espaço. Logo, para que se chegue a conclusões mais consistentes, é necessário que as medições do efluxo de CO₂ do solo sejam efetuadas por um período mais longo do que o realizado neste trabalho, que foi de um ano.

É possível observar a natureza complexa da relação do efluxo do CO₂ do solo com os fatores bióticos e abióticos na Tabela 4, em que somente quatro variáveis estão diretamente correlacionadas com a respiração do solo, mas outras variáveis influenciam estas, de diversas maneiras, formando um emaranhado de relações, em que o que afeta uma variável influencia as outras variáveis. Portanto, a grande quantidade de relações diretas e indiretas entre as variáveis medidas neste estudo, aliada ao número baixo de medidas de efluxo de CO₂ do solo ao longo do tempo, dificultou a compreensão dos mecanismos de controle do efluxo de CO₂ do solo. Em estudos futuros devem (1) ser feitas mais medições durante o ano e durante cada dia de medição no mesmo ponto, pois talvez a emissão de CO₂ do solo tenha diferentes comportamentos ao longo do dia de acordo com Sotta (2004) o efluxo de CO₂ do solo sofre variação ao diurna, sendo necessárias medições a cada duas horas para observar a variação durante o dia; e (2) incluir na comparação uma cronosequência de sistemas. Para analisar a zona de influência das espécies, sugere-se que o raio da zona de influência das espécies seja determinado de acordo com a copa das árvores (como sugerido por Sotta 2004) e não apenas usar um valor fixo de acordo com a localização geográfica, além de adotar uma metodologia específica para quantificar a respiração autotrófica.

CONCLUSÕES

O efluxo de CO₂ do solo foi mais sensível à sazonalidade pluviométrica, sendo maior no período chuvoso, provavelmente, devido a condições favoráveis de

temperatura e umidade neste período; e ao tipo de sistema agroflorestal testado do que aos outros fatores analisados, como raízes finas do solo, respiração microbiana e carbono do solo. O sistema mais diversificado apresentou melhor qualidade ambiental.

AGRADECIMENTOS

Aos empregados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) -Cléo Marcelo de Araújo Souza, Neusa Maria da Silva Ferreira, Everson Rocha Lima e Ivanildo Alves Trindade, pela ajuda no campo e no laboratório. A Financiadora de Estudo e Projetos (FINEP), Natura Inovação e Tecnologias de Produtos Ltda., Embrapa e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia dos Serviços Ambientais da Amazônia, pelo financiamento da pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela cessão da bolsa de estudo. Aos revisores, cujos comentários melhoraram a qualidade do artigo.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Adachi, M.; Ishida, A.; Bunyavejchewin, S.; Okuda, T. Ekoizumi, H. 2009. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. *Journal of Tropical Ecology*, 1: 531-539.
- Almeida, E.M.; Campelo Junior, J.H.; Finger, Z. 2010. Determinação do estoque de carbono em teca (*Tectona grandis* L. F.) em diferentes idades. *Ciência Florestal*, 20: 559-568.
- Becker, B.K. 2010. Recuperação de áreas deflorestadas da Amazônia: será pertinente o cultivo da palma de óleo (*Dendé*)? *Confins*, 10: 1958-9212.
- Carvalho, W.R. de; Vasconcelos, S.S.; Kato, O.R.; Capela, C.J.B.; Castellani, D.C. 2014. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. *Agroforestry Systems*, 88: 357-368.
- D'Andrea, A.F.; Silva, M.L.N. ; Freitas, D.A.F.; Curi, N.; Silva, C.A. 2010. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30: 85-92.
- Dias, A.T.C.; Ruijven, J.V.; Berendse, F. 2010. Plant species richness regulates soil respiration through changes in productivity. *Oecologia*, 163: 805-813.
- Diniz, T.; Ramos, M.L.G.; Vivaldi, L.J.; Alencar, C.M. de; Junqueira, N.T.V. 2014. Alterações microbianas e químicas de um gleissolo sob macaubeiras nativas em função da variação sazonal e espacial. *Bioscience Journal*, 30: 750-762.
- Embrapa. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2da ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 212p.
- Ferreira, D.F. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência agrotécnica*, 35: 1039-1042.
- Gama-Rodrigues, E.F.; Barros, N.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Santos, G.A. 2005. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa

- microbiana do solo em plantações de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29: 893-901.
- Garcez, S.L.A.; Mota, M.A.S. 2010. Validação das observações feitas com o pluviômetro de garrafa PET na cidade de Belém-PA. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém – PA. *Anais ... Belém: XVI CBMET*, 2010. CD- Rom.
- Haron, K.; Brookes, P.C.; Anderson, J.A.; Zakaria, Z.Z. 1998. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 547-552.
- Jenkinson, D.S.; Powlson, D.S. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-V: A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8: 209-213.
- Kozłowski, T.T.; Pallardy, S.G. 2002. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *The Botanical Review*, 68: 270-334.
- Luizão, R.C.C.; Bonder, T.A.; Rosswal, H. 1992. Seasonal variation of soil microbial biomass — The effects of clearfelling a tropical rainforest and establishment of pasture in the Central Amazon. *Soil Biology and Biochemistry*, 24: 805-813.
- Murphy, M.; Balsler, T.; Buchmann, N. Hahn, V.; Potvin, C. 2008. Linking tree biodiversity to belowground process in a young tropical plantation: Impacts on soil CO₂ flux. *Forest Ecology and Management*, 255: 2577-2588.
- Oliveira, M.L. de; Ruiz, H.A.; Costa, L.M. da; Schaefer, C.E.G.R. 2005. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura vegetal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9: 535-539.
- Pezarico, C.R.; Vitorino, A.C.T.; Mercante, F.M.; Daniel, O. 2013. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. *Revista de Ciências Agrárias*, 56: 40-47.
- Pimentel Gomes, F. 1990. *Curso de Estatística Experimental*. 12 ed. Nobel, Piracicaba, 1990, 467p.
- Pinto-Junior, O.B.; Sanches, L.; Dalmolin, A.C.; Nogueira, J.S. 2009. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. *Acta Amazonica*, 39: 813-822.
- Rangel-Vasconcelos, L.G.T.; Zarin, D.J. Carvalho, C.J.R.; Santos, M.M.L.; Vasconcelos, S.S.; Oliveira, F.A. 2005. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana de um solo sob vegetação secundária de diferentes idades na Amazônia Oriental. *Revista de Ciências Agrárias*, 44: 49-63.
- Rodrigues, M.A.C.M.; Miranda, I.S.; Kato, M.do S.A. 2007. Flora e estrutura da vegetação secundária após o uso de diferentes trituradores florestais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42: 459-465.
- Ryan, M.G.; Law, B.E. 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73: 3-27.
- Sampaio, G.; Nobre, C.; Costa, M.H.; Satyamurty, P.; Britaldo, S.S.F.; Cardoso, M. 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34: 1-7.
- Santiago, W.R.; Vasconcelos, S.S.; Kato, O.R.; Bispo, C.J.C.; Rangel-Vasconcelos, L.G.T.; Castellani, D.C. 2013. Nitrogênio mineral e microbiano do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. *Acta Amazonica*, 43: 395-406.
- Silva, E.E.da; Azevedo, P.H.S.; De-Polli, H. 2007. *Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)*. Comunicado técnico, 99. Embrapa, Seropédica, Rio de Janeiro, agosto. 4p.
- Simões, S.M.O.; Zilli, J.E.; Costa, M.C.G.; Tonini, H.; Balieiros, F.C. 2010. Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo em plantios de *Acacia mangium* no Cerrado de Roraima. *Acta Amazonica*, 40: 23-30.
- Smith, D.R.; Townsend, T.J.; Choy, A.W.K.; Hardy, I.C.W.; Sjögersten, S. 2012. Short-term soil carbon sink potential of oil palm plantations. *Global Change Biology Bioenergy*, 4: 588-596.
- Sotta, E.D.; Meir, P.; Malhi, Y.; Nobre, A. D.; Hodnett, M.; Grace, J. 2004. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon. *Global Change Biology*, 10: 601-617.
- Sotta, E.D.; Veldkamp, E.; Guimarães, B.R.; Paixão, R.K.; Ruivo, M.L.P.; Almeida, S. S. 2006. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian rainforest, Caxiuanã, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 237: 57-64.
- Sotta, E.D.; Veldkamp, E.; Schwendenmann, L.; Guimarães, B.R.; Paixão, R.K.; Ruivo, M.L.P.; Costa, A.C.L.; Meir, P. 2007. Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rain forest, Brazil. *Global Change Biology*, 13: 2218-2229.
- Vasconcelos, A.C.M.de ; Dinardo-Miranda, L.L. 2011. *Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides*. 2da ed. Campinas, São Paulo, 2011, 56p.
- Vincent, G.L.; Shahriari, A.R.; Lucot, E.; Badot, P-M; Epron, D. et al. 2006. Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 2527-2535.
- Zanchi, F.B.; da Rocha, H.R.; De Freitas, H.C.; Kruijt, B.; Waterloo, M.J.; Manzi, A. O. 2009. Measurements of soil respiration and simple models dependent on moisture and temperature for an Amazonian southwest tropical Forest. *Biogeosciences Discuss*, 6: 6147-6177.

Recebido em 21/01/2015

Aceito em 08/06/2015

