

Artigo

## Fluxos de CO<sub>2</sub> em Plantio de Palma de Óleo no Leste da Amazônia

Luiz Carlos Neves da Fonseca<sup>1\*</sup>, Alessandro Carioca de Araújo<sup>2\*</sup>, Antônio Ocimar Manzi<sup>3</sup>,  
Claudio José Reis de Carvalho<sup>4</sup>, Leonardo Ramos de Oliveira<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, Brasil.*

<sup>2</sup>*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, Brasil.*

<sup>3</sup>*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.*

<sup>4</sup>*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, Brasil.*

<sup>5</sup>*Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil.*

Recebido em 6 de Junho de 2017 – Aceito em 10 de Novembro de 2017

### Resumo

Os ecossistemas terrestres são importantes para compreender as trocas de CO<sub>2</sub> entre superfície e atmosfera. Este trabalho apresenta as condições atmosféricas e medidas de CO<sub>2</sub> em palma de óleo com híbrido interespecífico no leste da Amazônia, durante ano de El Niño. O experimento foi realizado em Moju - Pará, onde foi instalada uma torre micrometeorológica para obtenção de dados meteorológicos e de CO<sub>2</sub> durante o período de janeiro-dezembro de 2015. Os valores médios diurnos de absorção de CO<sub>2</sub> atingiram o máximo por volta do meio dia, com 22,3 (± 0,98) μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> no período chuvoso e 21,0 (± 0,47) μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> no período menos chuvoso. Houve pouca variação noturna nos valores médios de emissão de CO<sub>2</sub>, 5 (± 0,20) μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, em ambos os períodos. Os valores médios diurnos da concentração de CO<sub>2</sub> foram menores e os valores médios noturnos foram maiores. Em geral, o ciclo diário de troca de CO<sub>2</sub> apresentou diferença entre o período chuvoso e menos chuvoso. Esses resultados contribuem para melhor compreensão da tendência temporal dos fluxos de CO<sub>2</sub> em cultivo agrícola em ano de seca no leste da Amazônia, gerando informações novas sobre a interação entre palma de óleo e atmosfera.

**Palavras-chave:** dióxido de carbono; fluxo, palma de óleo.

## CO<sub>2</sub> Fluxes in Oil Palm Plantation in Eastern Amazonia

### Abstract

Terrestrial ecosystems are important for the CO<sub>2</sub> exchange between surface and atmosphere. This work presents the atmospheric conditions and CO<sub>2</sub> measurements in interspecific hybrid of oil palm in eastern Amazonia, during El Niño year. The experiment was carried out in Moju - Pará, where a micrometeorological tower was installed to obtain meteorological and CO<sub>2</sub> data during the period from January to December 2015. The diurnal averages of CO<sub>2</sub> uptake peaked at noon, with 22.3 (± 0.98) μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in the wet season and 21.0 (± 0.47) μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in the dry season. There was little variation in nocturnal averages of CO<sub>2</sub> emission, about 5 (± 0.20) μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, in both wet and dry seasons. The diurnal averages of CO<sub>2</sub> concentration were lower and nocturnal averages were higher. Generally, the daily CO<sub>2</sub> exchange cycle presented a difference between the wet and dry season. These results contribute to a better understanding of the temporal trend of CO<sub>2</sub> fluxes in agricultural crop during drought year in eastern Amazonia, generating new pieces of information about the interaction between oil palm and atmosphere.

**Keywords:** carbon dioxide, fluxes, oil palm.

Autor de correspondência: Luiz Carlos Neves da Fonseca, [luizneves.agro@gmail.com](mailto:luizneves.agro@gmail.com).

\*Ambos os autores contribuíram igualmente para este artigo.

## 1. Introdução

As trocas do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre a vegetação e a atmosfera são importantes para compreender o papel da biosfera terrestre no balanço de carbono (C). Por definição, esse balanço consiste na diferença entre os ganhos e as perdas de C através de processos biológicos, como fotossíntese e respiração autotrófica e heterotrófica. Esses processos são fundamentais na absorção e liberação de gases de efeito estufa (GEE), como o CO<sub>2</sub> (Heimann e Reichstein, 2008). Em média, a biosfera terrestre tem atuado como sumidouro de C, sendo responsável por remover da atmosfera, aproximadamente, um terço de CO<sub>2</sub> emitido pela queima de combustíveis fósseis, diminuindo o acúmulo de CO<sub>2</sub> atmosférico (Canadell *et al.*, 2007).

Um bioma terrestre brasileiro que recebe atenção em nível mundial é a Amazônia, onde ciclos sazonais de precipitação (P), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), déficit de pressão de vapor (DPV) e radiação solar contribuem para distinções na troca de C entre a superfície e a atmosfera (Zeri *et al.*, 2014). Por isso, a Amazônia é um sistema acoplado entre a vegetação e as condições atmosféricas (Rocha *et al.*, 2004).

Em condições climáticas extremas, a vegetação pode diminuir a absorção de C, visto que mudanças associadas ao sistema climático influenciam os fluxos de CO<sub>2</sub> entre a superfície e a atmosfera (Zscheischler *et al.*, 2014; Frank *et al.*, 2015). Por exemplo, grande parte da Amazônia pode liberar CO<sub>2</sub> para atmosfera quando ocorre baixa P durante anos com evento El Niño Oscilação Sul (ENOS), atuando geralmente como fonte de CO<sub>2</sub> (emissão para a atmosfera) devido clima quente e seco em anos com El Niño (Saleska *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2011).

Ainda sobre o bioma Amazônia, a expansão e a intensificação da agricultura, da extração de madeira e da urbanização avançaram e reduziram a cobertura florestal durante as últimas décadas (Davidson *et al.*, 2012). Consequentemente, esses processos de mudança no uso e cobertura da terra resultaram em 41.388.200 ha de área desmatada na região amazônica entre os anos de 1988 e 2015, sendo o estado do Pará com 14.013.400 ha, equivalente a ~34% de área desmatada no mesmo período na região (Inpe, 2016).

Sobre o uso das áreas desmatadas na Amazônia, uma política adequada consiste em substituir essas áreas por cultivos perenes (Homma, 2012). Nesse cenário, a palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma cultura perene que possui porte arbóreo e atua na captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, o que a torna uma alternativa de produção agrícola nas áreas já desmatadas, conforme estabelecido pelo Programa de Produção Sustentável de Palma de Óleo (PPSPO) em 2010.

Em termos de absorção de CO<sub>2</sub>, estudo realizado na mesma região tropical, em Sabah-Bornéu-Malásia, demonstrou que o valor médio diurno de absorção em cultivo adulto de palma de óleo com híbridos interespecíficos

(HIE) (*Elaeis guineensis* Jacq. x *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés) foi o dobro do obtido em floresta primária, respectivamente 24,86 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (25,8 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e 9,73 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (10,1 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) (Fowler *et al.*, 2011).

Destaca-se que estudos sobre a troca de CO<sub>2</sub> em palma de óleo com HIE são escassos. A maior parte das pesquisas é realizada em cultivo de palma de óleo com híbridos intraespecíficos, ocorrendo principalmente na Indonésia e na Malásia (Henson, 1995; Henson e Harun, 2005; Lamade e Bouillet, 2005). No Brasil, as informações a respeito dos fluxos de CO<sub>2</sub> são obtidas, em geral, a partir de pesquisas em locais de floresta primária na Amazônia (Goulden *et al.*, 2004; Von Randow *et al.*, 2004; Hutyra *et al.*, 2008; Araújo *et al.*, 2010).

Considerando a expansão do cultivo de palma de óleo em áreas desmatadas na Amazônia e a capacidade da cultura de atuar na captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, o objetivo deste trabalho foi analisar os fluxos de CO<sub>2</sub> em cultivo de palma de óleo com HIE no leste da Amazônia durante ano com ocorrência de evento El Niño, estabelecendo correlações com as condições atmosféricas que influenciam as trocas gasosas na interface superfície-atmosfera. O questionamento científico deste trabalho tem como foco compreender a variação diária e sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> em palma de óleo no leste da região amazônica, sendo este trabalho um suporte inicial e importante para pesquisas futuras destinadas à compreensão da dinâmica do CO<sub>2</sub> em cultivo agrícola na Amazônia.

Por fim, ressalta-se que entre as aspirações das redes de pesquisas sobre fluxos de massa está a importância da obtenção de séries temporais que permitam detectar a tendência temporal dos fluxos de C e os fatores biofísicos que contribuam para a variação desses fluxos (Baldocchi *et al.*, 2017).

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Descrição da área do experimento

O experimento foi conduzido em um cultivo adulto de palma de óleo com HIE, na empresa Marborges Agro-indústria S.A. (1°59'29" S, 48°36'34" O), localizada no município de Moju, nordeste do Pará, Brasil. Em 2015, a vegetação estava no nono ano de plantio e com altura média do topo do dossel em torno de 8 m (altura da ponta da flecha). As plantas foram dispostas na forma de triângulo equilátero, com espaçamento de 9 x 9 x 9 m e densidade de plantio igual a 143 plantas por hectare.

Na área, foi instalada uma torre de observações micrometeorológicas (1°58'43,2" S; 48°36'52,8" O) para a obtenção de dados meteorológicos e de fluxos de massa (CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O), em dezembro de 2013. A torre possui 23 m de altura, estrutura de alumínio e pavimentos com seção de 1,40 m x 1,70 m.

Na área do experimento, o clima é Af. Essa classificação climática também ocorre na capital Belém e nos municípios da região leste do Pará, bem como está presente em mais de 28% da área do estado (Alvares *et al.*, 2014). O período chuvoso abrangeu os meses de dezembro-junho e o período menos chuvoso incluiu os meses de julho-novembro. Conforme Bastos (2001), o período menos chuvoso apresenta curta duração e a deficiência hídrica anual é moderada (entre 100 e 350 mm), de acordo com o estabelecido no mapa de aptidão agroclimática para o cultivo de palma de óleo no Pará.

## 2.2. Instrumentação

Os instrumentos utilizados para obtenção das variáveis meteorológicas são apresentados na Tabela 1. Os dados foram coletados e registrados a cada 60 s, como valor instantâneo, e a partir desses dados também foram registradas médias de 30 min.

Um sistema de fluxo composto por um anemômetro ultrassônico 3D integrado com um analisador de gás por infravermelho do tipo caminho aberto (Irgason, Campbell Scientific Inc., Logan UT, EUA) foi instalado a 12,4 m de altura acima do solo, a uma distância lateral de 1 m da torre, com a face principal voltada para a direção do vento predominante, nordeste (0-90°). O sistema registrou as flutuações da densidade absoluta de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e os componentes ortogonais do vento (*u*, *v* e *w*), com taxa de amostragem de 10 Hz.

Um analisador de gás por infravermelho do tipo caminho fechado (LI-820, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA) foi utilizado para medir o perfil vertical da concentração de CO<sub>2</sub> [CO<sub>2</sub>] atmosférico em seis alturas acima do solo (Tabela 1). Em cada altura, o ar foi amostrado por um intervalo de 150 s.

O ar foi conduzido por um conjunto de tubos de poliuretano, com comprimento diferente para cada altura e contendo tela de proteção nas extremidades. Um conjunto de seis válvulas solenóides (EVO-3-12, Clippard, Cincinnati, OH, EUA) foi utilizado para realizar as trocas entre as alturas de entrada, sendo acionado por um dispositivo síncrono de medidas (SDM-CD8S, Campbell Scientific Inc., Logan UT, EUA) que controlava o acionamento individual

de cada uma das válvulas. Foi utilizada uma microbomba de ar (NMP850KNDCB, KNF Neuberger, Freiburg, Alemanha), com vazão máxima de 0,8 L min<sup>-1</sup>, para coleta e condução do ar até o analisador (Oliveira *et al.*, 2015).

Um microcontrolador eletrônico (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan UT, EUA) foi utilizado para o registro e o armazenamento dos dados. Os dados também eram registrados em um cartão de memória (CFV-2GB-TSI-35-22, Campbell Scientific Inc., Logan UT, EUA), que era substituído e transportado em visitas semanais ou quinzenais do local de coleta para a Embrapa Amazônia Oriental, com sede em Belém-Pará.

## 2.3. Dados meteorológicos e de CO<sub>2</sub>

Os dados meteorológicos e do sistema de fluxo utilizados nesse estudo foram coletados durante o período de janeiro-dezembro de 2015. Os dados foram convertidos do formato binário para ascii utilizando um programa específico (LoggerNet 4.2, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA). Os dados do sistema de fluxo, após convertidos, foram processados com o programa Alteddy versão 3.9 (Alterra, Wageningen) que calcula as médias, as variâncias e aplica as correções necessárias, com base na metodologia Euroflux (Aubinet *et al.*, 2000). Os dados do fluxo turbulento (*F<sub>c</sub>*) foram obtidos a cada 30 min, utilizando a técnica de covariância de vórtices turbulentos, conforme a Eq. (1):

$$F_c = \overline{\rho_a w' c'} \quad (1)$$

onde as barras superiores representam as médias temporais, apóstrofos são as flutuações em relação ao valor médio,  $\rho_a$  é a densidade do ar, *w* é a velocidade vertical do vento e *c* é a razão de mistura do CO<sub>2</sub> (Baldocchi, 2003).

Os dados da [CO<sub>2</sub>] foram registrados como valores médios a cada 15 min, tempo necessário para completar um ciclo em todo o perfil. Os dados foram convertidos em médias de 30 min e utilizados para estimar o armazenamento do CO<sub>2</sub> no dossel (*S*). De modo simples, o balanço de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) foi obtido por meio da soma de *F<sub>c</sub>* e *S*, conforme Eq. (2):

**Tabela 1** - Lista das medidas e instrumentos instalados na torre micrometeorológica, em Moju-PA, que foram utilizados nesse estudo.

Variável	Instrumento	Altura (m)
Onda curta incidente e refletida	Piranômetro	18,21
Onda longa atmosférica e terrestre	Pirgeômetro	18,21
Precipitação	Pluviômetro	22,65
Perfil da temperatura e umidade relativa do ar	Termohigrômetro	22,7; 15,94; 10,4; 6,75; 2,25
Perfil da Concentração de CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O	Analisador de gás por infravermelho (caminho fechado)	22,2; 15,4; 9,9; 5,8; 2,1; 0,5
Concentração de CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O	Analisador de gás por infravermelho (caminho aberto)	12,4
Direção e velocidade do vento ( <i>u</i> , <i>v</i> , <i>w</i> )	Anemômetro ultrassônico 3D	12,4

$$NEE = F_c + \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{22,2} c(h) dh \quad (2)$$

onde o primeiro termo do lado direito é  $F_c$ , descrito conforme a Eq. (1), e o segundo termo é  $S$ , sendo que  $t$  é o tempo,  $h$  é a altura acima da superfície do solo e  $c$  é concentração do  $CO_2$ , as barras superiores denotam as médias temporais e  $dh$ ;  $\partial$  representam a derivada de uma dada função (Bonal, 2008).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Cobertura temporal dos dados

O registro dos dados de P da torre de Moju apresentou falhas ( $n = 12.432$ , 71% de cobertura dos dados) devido a problemas técnicos nos instrumentos. Essas falhas foram verificadas em 29 dias em janeiro (Dia do ano - DDA: 001-029), 1 dia em março (DDA 077), 4 dias em julho (DDA 209-212), 20 dias em agosto (DDA 213-232), 21 dias em outubro (DDA 281-301), 31 dias em dezembro (DDA 335-365). Houve preenchimento dos valores diários ausentes, utilizando-se os valores de P, registrados próximos da torre e cedidos pela empresa Marborges Agro-indústria S.A.

A onda curta incidente ( $OC_{in}$ ) e o saldo de radiação ( $R_n$ ) apresentaram falhas no registro de dados ( $n = 15.264$ , 87% de cobertura dos dados) em 1 dia em março (DDA 077), 1 dia em maio (DDA 128), 4 dias em julho (DDA 209-212), 20 dias em agosto (DDA 213-232), 21 dias em outubro (DDA 281-301).

T e UR tiveram ausência de dados ( $n = 15.312$ , 87% de cobertura dos dados) em 1 dia em março (DDA 077), 4 dias em julho (DDA 209-212), 20 dias em agosto (DDA 213-232), 21 dias em outubro (DDA 281-301). DPV ( $n = 15.312$ , 87% de cobertura dos dados) foi obtido a partir dos dados de T e de UR na altura imediatamente acima do dossel (10,4 m) e foi calculado com base em Alvarenga *et al.* (2014).

A cobertura dos dados de  $F_c$  ( $n = 13.990$ , 79,8%), de  $S$  ( $n = 13.982$ , 79,8%) e de  $NEE$  ( $n = 13.982$ , 79,8%) apresentou ausências aleatórias durante o período estudado, equivalente a 1 dia em março (DDA 077), 6 dias em junho (DDA 172-176, 180), 7 dias em julho (DDA 183, 187, 208-212), 20 dias em agosto (DDA 213-232), 21 dias em outubro (DDA 281-301), 3 dias em novembro (DDA 322-324).

A cobertura dos dados meteorológicos dessa pesquisa foi semelhante aos valores obtidos por Falge *et al.* (2001). Esse estudo demonstrou que a cobertura média anual dos dados meteorológicos, por exemplo, T, UR, DPV e  $R_n$ , foi em torno de 90% (~10% de perda) e que a cobertura dos dados do sistema de fluxo foi de apenas 65% devido às falhas do sistema, inferior ao percentual de dados de  $CO_2$  dessa pesquisa.

#### 3.2. Variação sazonal das condições atmosféricas

A Fig. 1a apresenta o período chuvoso e o período menos chuvoso que foram representados com base no valor de referência igual a  $150 \text{ mm mês}^{-1}$ , déficit hídrico para o cultivo de palma de óleo (Carr, 2011). Alguns estudos anteriores sobre P no estado Pará (Ávila *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2013) evidenciaram que a maior parte de P ocorre entre as estações de verão e outono austral, geralmente entre dezembro a maio, o que está associado aos padrões de circulação atmosférica de grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

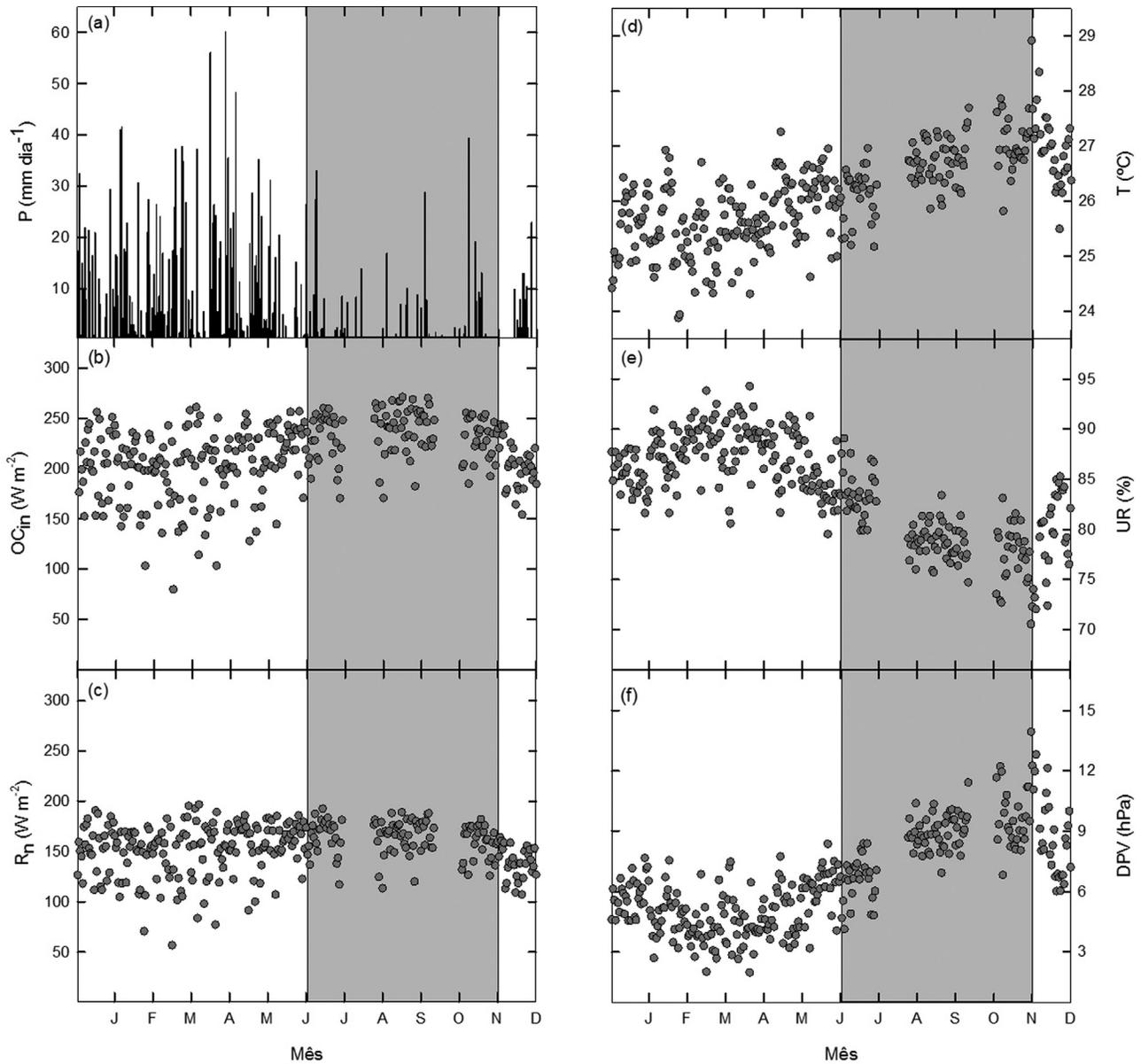
Houve maior variação diária de P acumulada nos meses de março, abril e maio e menor nos meses de agosto, setembro e outubro. Durante o período chuvoso, os valores diários de P foram, em sua maioria, na faixa entre 0 e 30 mm, entretanto houve registros superiores (56 e 60 mm) nos dias 15 e 27 de abril, respectivamente. Durante o período menos chuvoso, os valores diários foram mais baixos, em sua maioria, na faixa entre 0 e 15 mm, porém com registros máximos de 33 e 39 mm em julho e novembro, respectivamente (Fig. 1a).

P acumulada anual (janeiro-dezembro de 2015) foi  $2.320 \text{ mm}$  no local de condução do experimento, sendo  $1.974 \text{ mm}$  no período chuvoso ( $p > 150 \text{ mm mês}^{-1}$ ) e  $345 \text{ mm}$  no menos chuvoso ( $p < 150 \text{ mm mês}^{-1}$ ), como apresentados na Tabela 2. Esses valores foram inferiores à média climatológica de Belém-Pará (1980-2015), cujo valor foi de  $3.156 \text{ mm}$ , obtido a partir dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Provavelmente, isso pode estar relacionado ao evento El Niño ocorrido no leste da Amazônia. Em estudo sobre as secas na região amazônica, Alves *et al.* (2013) salientaram que os totais de chuva no período chuvoso e menos chuvoso ficaram abaixo da

**Tabela 2** - P acumulada mensal no local do experimento (Moju, 2015) e a média climatológica em Belém (1980-2015).

Meses	P acumulada ( $\text{mm mês}^{-1}$ )	
	Moju (2015)	Belém (1980-2015)
Janeiro	276,4	396,0
Fevereiro	307,3	418,9
Março	377,0	475,5
Abril	356,6	434,1
Maio	339,3	300,4
Junho	160,3	193,6
Julho	116,2	160,9
Agosto	39,8	140,5
Setembro	71,6	127,0
Outubro	18,7	118,0
Novembro	99,3	135,0
Dezembro	157,0	255,8

Fonte: (Torre, 2015; INMET, 1980-2015).



**Figura 1** - Variação sazonal dos valores médios diários de (a) P, (b)  $OC_{in}$ , (c)  $R_n$ , (d) T, (e) UR e (f) DPV em 2015, Moju-PA. As linhas verticais representam o acumulado diário e cada círculo fechado representa a média diária. T, UR e DPV foram obtidos na altura (10,4 m) imediatamente acima do topo do dossel (8 m). Período menos chuvoso representado com fundo cinza.

média em 1998, 2005 e 2010, o que é compatível com resultados encontrados neste estudo.

Em 2015, a distribuição espacial da seca sobre a Amazônia apresentou padrão atípico, ou seja, houve um dipolo úmido-seco incomum entre o sudoeste e o nordeste da região, ocorrendo secas típicas de El niño apenas no leste e uma umidade incomum no oeste da Amazônia. Esse contraste úmido-seco pode ser atribuído aos diferentes padrões de precipitação resultantes do aquecimento do pacífico equatorial central em 2015 (Jiménez-Muñoz *et al.*; 2016).

Os valores médios de radiação de  $OC_{in}$  e  $R_n$  foram  $203 (\pm 2,3) \text{ W m}^{-2}$  e  $150 (\pm 1,8) \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente, no

período chuvoso, e  $235 (\pm 2,2) \text{ W m}^{-2}$  e  $164 (\pm 1,6) \text{ W m}^{-2}$  no período menos chuvoso, como mostrado na Fig. 1b e 1c. Sobre essa redução da radiação solar no período chuvoso, Costa *et al.* (2009) explicam que a maior cobertura de nuvens nessa época ocasiona maior espalhamento da radiação devido aos múltiplos reflexos que ocorrem quando os raios solares se chocam com as gotículas de água, responsáveis pela formação das nuvens.

A variação sazonal dos valores médios diários de T foi crescente e de UR foi decrescente durante a transição do período chuvoso para o menos chuvoso, como pode ser observado nas Figs. 1d e 1e. O valor médio de T foi  $25,8 (\pm 0,1) \text{ }^\circ\text{C}$  no período chuvoso e  $26,7 (\pm 0,1) \text{ }^\circ\text{C}$  no menos

chuvoso, registrando mínimo de 23,9 °C (fevereiro) e máximo de 28,9 °C (novembro) (Fig. 1d). O valor médio de UR foi 86 ( $\pm 0,3$ ) % no período chuvoso e 79 ( $\pm 0,3$ ) % no menos chuvoso. Os valores, mínimo e máximo, das médias diárias de UR foram 70,5% (novembro) e 94,3% (abril), respectivamente (Fig. 1e). O DPV, forçante de transpiração da plantas, variou de forma similar à T, ou seja, apresentando valor médio diário de 5,5 ( $\pm 0,1$ ) hPa e de 8,7 ( $\pm 0,2$ ) hPa no período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente. O menor valor médio diário foi igual a 2 hPa (abril) e o maior foi igual a 14 hPa (novembro) (Fig. 1f).

### 3.3. Variação diária e sazonal do NEE

A Fig. 2 mostra que o ciclo médio diário de NEE, em cultivo de palma de óleo, apresentou semelhanças entre o período chuvoso e menos chuvoso do ano de 2015. Os valores positivos indicam o movimento de CO<sub>2</sub> do ecossistema para atmosfera e os valores negativos representam o predomínio da absorção de CO<sub>2</sub> pelo ecossistema a partir de medidas integrativas dos processos de fotossíntese e respiração.

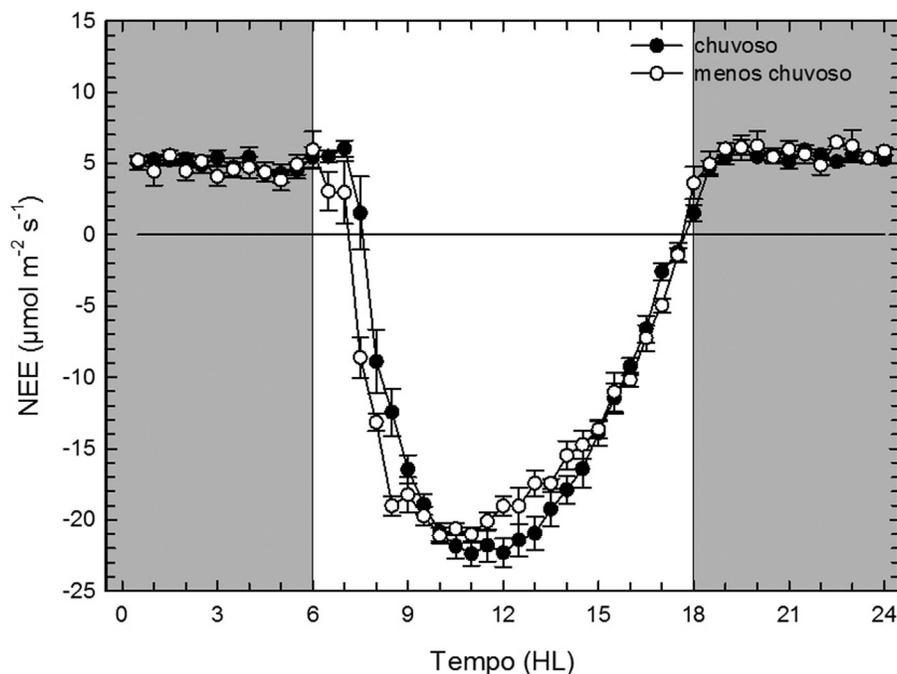
Durante a noite, os valores médios de NEE foram em torno de 5 ( $\pm 0,20$ )  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  tanto no período chuvoso quanto no menos chuvoso, indicando pouca variação da emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera, mostrado na Fig. 2. Essa pouca variação pode ser explicada pelo resfriamento da superfície que contribui para a redução nos valores médios de velocidade de fricção ( $u_*$ ), indicativo da atividade turbulenta, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. Quantitativamente, os valores médios de  $u_*$  foram

0,07  $\text{m s}^{-1}$  entre 00:30 e 06:00 e em torno de 0,14 ( $\pm 0,01$ )  $\text{m s}^{-1}$  (chuvoso) e de 0,18 ( $\pm 0,01$ )  $\text{m s}^{-1}$  (menos chuvoso) entre 18:30 e 24:00, apresentados na Fig. 3b.

Em pesquisa realizada por Miller *et al.* (2004), sobre o balanço de carbono em floresta no estado do Pará, foi observado que condições de estabilidade noturna resultam em grande acúmulo de CO<sub>2</sub> abaixo do dossel, influenciado pela menor atividade turbulenta. Além disso, enfatizou-se que a produção biológica de CO<sub>2</sub> pela planta e respiração microbiana é independente da mistura turbulenta.

Durante o dia, houve variação bem definida nos valores médios de NEE, atingindo o valor máximo de -22,3 ( $\pm 0,98$ )  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  às 12:00 (Horário Local, HL) no período chuvoso, superior a -21,0 ( $\pm 0,47$ )  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  às 11:00 (HL) no período menos chuvoso (Fig. 2). Isso pode estar associado ao evento El Niño no leste da Amazônia, o que em geral contribui para diminuição da fotossíntese e da troca de CO<sub>2</sub> (Baker *et al.*, 2008; Doughty e Goulden, 2008; Moura *et al.*, 2015). A sazonalidade das chuvas é importante para o funcionamento dos ecossistemas tropicais uma vez que períodos secos mais longos ou mais intensos podem levar a uma redução na atividade fotossintética da vegetação (Guan *et al.*, 2015), limitando as trocas gasosas entre a planta e a atmosfera.

Diferentemente do reportado em muitos estudos que tratam do aumento da fotossíntese e, conseqüentemente, da absorção de CO<sub>2</sub> no período menos chuvoso (Van Schaik *et al.*, 1993; Saleska *et al.*, 2003; Huete *et al.*, 2006; Brando *et al.*, 2010). Por exemplo, em floresta tropical da reserva biológica do Cuieira, Amazonas - Brasil, estudo reportou



**Figura 2** - Ciclo médio diário de NEE em cultivo de palma de óleo durante o período chuvoso (círculo fechado) e menos chuvoso (círculo aberto), em 2015, Moju-PA. Cada círculo representa a média de 30 min. Noite representada com fundo cinza.

que os valores médios diurnos de NEE atingiram pico de absorção de CO<sub>2</sub> equivalente a  $-17,84 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (às 12:00) no período chuvoso e igual a  $-20,88 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (às 10:00 da manhã) no período menos chuvoso (Araújo *et al.*, 2010).

Em estudo sobre a troca de CO<sub>2</sub> em floresta tropical (Malhi *et al.*, 1998;) também foi mostrado que existe pouca variação na média noturna de NEE e maior variação apenas em condições de luz, indicando que as mudanças sazonais ocorrem em função da fotossíntese em vez da respiração, o que concorda com o presente estudo.

Entre 08:00 e 10:00 (HL), os valores médios de NEE aumentaram rapidamente (ficando mais negativos) tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso, com base na Fig. 2. Esse horário coincide com o incremento rápido de fatores físicos que contribuem para entrada e transporte de CO<sub>2</sub> no ecossistema. Por exemplo, nessas duas horas, os valores médios de OC<sub>in</sub> variaram de  $213 \text{ W m}^{-2}$  até  $524 \text{ W m}^{-2}$  (chuvoso) e de  $294 \text{ W m}^{-2}$  até  $650 \text{ W m}^{-2}$  (menos chuvoso) (Fig. 3a), bem como os valores médios de  $u_*$  variaram de  $0,20 (\pm 0,01) \text{ m s}^{-1}$  até  $0,46 (\pm 0,03) \text{ m s}^{-1}$  (chuvoso) de  $0,33 (\pm 0,02) \text{ m s}^{-1}$  até  $0,63 (\pm 0,02) \text{ m s}^{-1}$  (menos chuvoso) (Fig. 3b).

Chapin *et al.* (2002) ressaltam que a captura da radiação solar durante a fotossíntese responde quase instantaneamente às variações na disponibilidade de luz para as folhas, que absorvem o CO<sub>2</sub>, em condições de luz, para a produção de matéria orgânica. Além disso, Arya (2001) afirma que sem a atividade turbulenta, a troca de massa, por exemplo de CO<sub>2</sub>, seria em escala molecular e em magnitude minúscula, com valor  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$  vezes menor do que a transferência de massa e de energia ocasionada pela turbulência.

A partir de 10:00 (HL), os valores médios de NEE foram mais negativos ( $\geq -20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e ocorreram durante intervalos de tempo de 3 horas e 2 horas no período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente. Nesses intervalos, os valores médios de OC<sub>in</sub> e de  $u_*$  foram elevados no

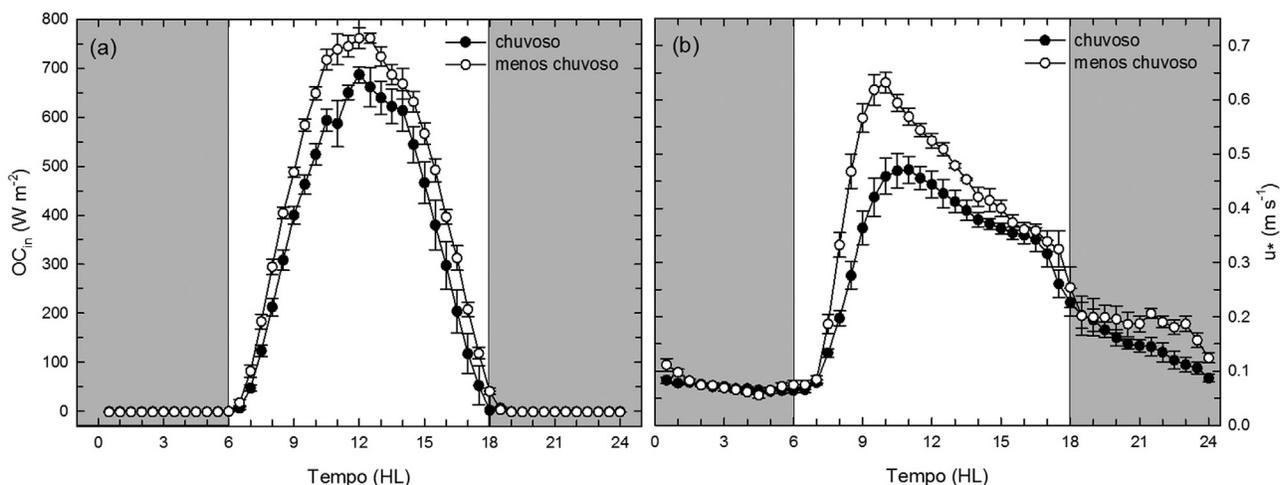
período chuvoso e menos chuvoso, conforme observado na Fig. 3, bem como o DPV atingiu valor médio de 9,5 hPa (chuvoso) e 13,4 hPa (menos chuvoso) às 10:30 (HL), o que equivale cerca de 60% do valor máximo do ciclo diário (Fig. 4). Isso sugere que a troca de CO<sub>2</sub> depende tanto de fatores biológicos quanto de fatores físicos.

Por meio da regressão linear múltipla entre as medidas de CO<sub>2</sub> (NEE) e as variáveis OC<sub>in</sub> e DPV, foi obtido o coeficiente de correlação ( $r$ ) igual a 0,77 no período chuvoso e 0,78 no período menos chuvoso, indicando uma relação linear positiva entre as variáveis, que tendem a variar no mesmo sentido. Além disso, o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi equivalente a 0,60 (chuvoso) e 0,61 (menos chuvoso), significando que em torno de 60% da variação dos fluxos de CO<sub>2</sub> é explicada pela combinação das variáveis atmosféricas (OC<sub>in</sub> e DPV).

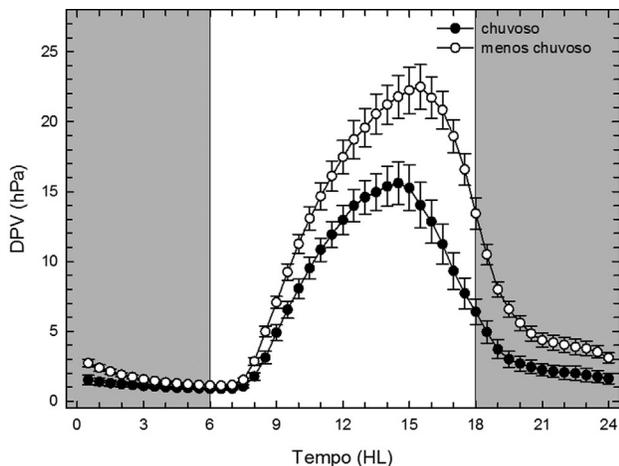
Essa relação biofísica foi também abordada por Röhl (2015), ao tratar da transpiração palma de óleo na Indonésia. Nesse estudo foi observado que os plantios em idade produtiva apresentam aumento das taxas de transpiração com incremento do DPV durante a manhã, atingindo o pico de transpiração em cerca de 60% do DPV máximo diário.

A partir de 13:30 (HL) no período chuvoso e 12:00 (HL) no período menos chuvoso, houve diminuição gradativa nos valores de NEE (ficando menos negativos), coincidindo com DPV de 15 hPa e 17,5 hPa, respectivamente, apresentados na Fig. 4. Isso sugere um controle ecofisiológico da vegetação para limitar a transpiração e, conseqüentemente, a absorção de CO<sub>2</sub> quando em valores de DPV  $\geq 15$  hPa.

Esses valores de DPV foram próximos aos valores obtidos por Dufréne e Saugier (1993) em cultivos de palma de óleo na Costa do Marfim, onde foi observada uma redução na absorção de CO<sub>2</sub> como resposta ao aumento do DPV, a partir de 18 hPa, influenciando no fechamento estomático e, conseqüentemente, na redução da taxa de transpiração do cultivo.



**Figura 3** - Ciclo médio diário de (a) OC<sub>in</sub> e de (b)  $u_*$  em cultivo de palma de óleo durante o período chuvoso (círculo fechado) e menos chuvoso (círculo aberto), em 2015, Moju-PA. Cada círculo representa a média de 30 min. Noite representada com fundo cinza.



**Figura 4** - Ciclo médio diário de DPV em cultivo de palma de óleo durante o período chuvoso (círculo fechado) e menos chuvoso (círculo aberto), em 2015, Moju-PA. Cada círculo representa a média de 30 min. O DPV foi obtido na altura (10,4 m) imediatamente acima do topo do dossel (8 m). Noite representada com fundo cinza.

Na literatura, outros trabalhos com palma de óleo também destacaram o DPV como um fator atmosférico importante na influência na troca de  $\text{CO}_2$  entre superfície e atmosfera, de modo que o aumento do DPV diminui a absorção de  $\text{CO}_2$  pelo dossel (Henson, 1998; Henson e Harun, 2005).

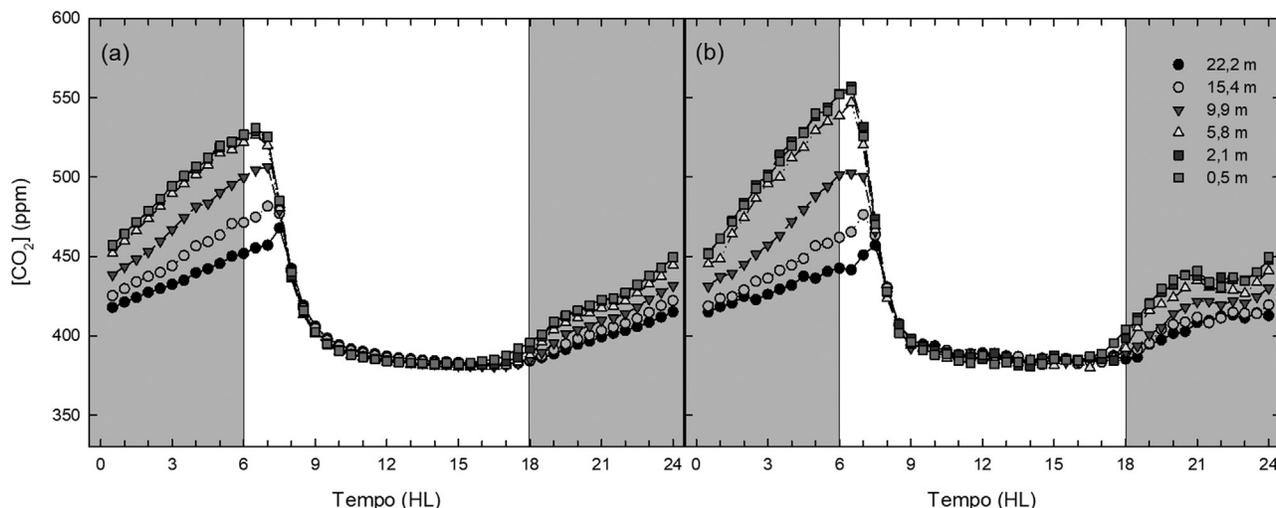
Houve redução menos acentuada nos valores médios de NEE no período chuvoso do que no menos chuvoso a partir de 13:00 e 12:00 (HL), respectivamente. Isso pode estar relacionado com o proposto por Carr (2001), ao descrever as mudanças sazonais na abertura dos estômatos em palma de óleo. Nesse estudo foi demonstrado que os estômatos iniciam a abertura no início da manhã e permanecem abertos ao longo do dia no período chuvoso. Entretanto, ocorre fechamento parcial por volta do meio dia no período menos chuvoso.

### 3.4. Variação diária e sazonal do perfil vertical da $[\text{CO}_2]$

As Figs. 5a e 5b mostram que houve aumento da  $[\text{CO}_2]$  nos diferentes níveis durante a noite. Os níveis abaixo do dossel (5,8; 2,1; 0,5 m) registraram os maiores valores médios da  $[\text{CO}_2]$  e os níveis acima do dossel (22,2; 15,4 e 9,9 m) apresentaram os menores valores tanto no período chuvoso quanto no menos chuvoso. O aumento da  $[\text{CO}_2]$  deve-se tanto ao processo de respiração quanto à baixa mistura turbulenta, que contribuem para o acúmulo noturno de  $\text{CO}_2$ , principalmente abaixo do dossel. Nas primeiras horas da manhã, há uma retirada rápida de  $\text{CO}_2$ , quando a atividade turbulenta aumenta devido ao aumento da radiação solar e, conseqüentemente, de T (Buchmann *et al.*, 1997).

Durante o dia, houve diminuição da  $[\text{CO}_2]$  em todos os níveis, com diferenças praticamente inexistentes até o pôr do sol, às 18:00 (HL). O pico da  $[\text{CO}_2]$  nos níveis abaixo do dossel ocorreu às 06:30 (HL) tanto no período chuvoso (530 ppm) quanto no período menos chuvoso (555 ppm). Porém, nos níveis acima do dossel (22,2; 15,4 e 9,9 m), o valor máximo da  $[\text{CO}_2]$  foi entre 450 e 500 ppm, registrado às 07:00 (HL), sugerindo transporte do  $\text{CO}_2$ , aprisionado durante a noite, dos níveis mais baixos para os mais altos no início da manhã (Figs. 5a e 5b). A variação diurna da  $[\text{CO}_2]$  ocorre em função do metabolismo das plantas e do transporte atmosférico. A fotossíntese remove o  $\text{CO}_2$  do ar, resultando em menores concentrações, e o movimento do  $\text{CO}_2$  é dominado pela atividade turbulenta durante períodos convectivos (Goulden *et al.*, 2006).

Os gradientes verticais da  $[\text{CO}_2]$  aumentaram durante a noite (01:30, 03:30, 05:30, 18:30, 20:30 e 22:30) entre o nível mais alto (22,2 m) e mais baixo (0,5 m) no período chuvoso e no menos chuvoso (Fig. 6). As diferenças da  $[\text{CO}_2]$  entre os níveis citados foram menos expressivas às 18:30 (HL), transição entre o período diurno e noturno,



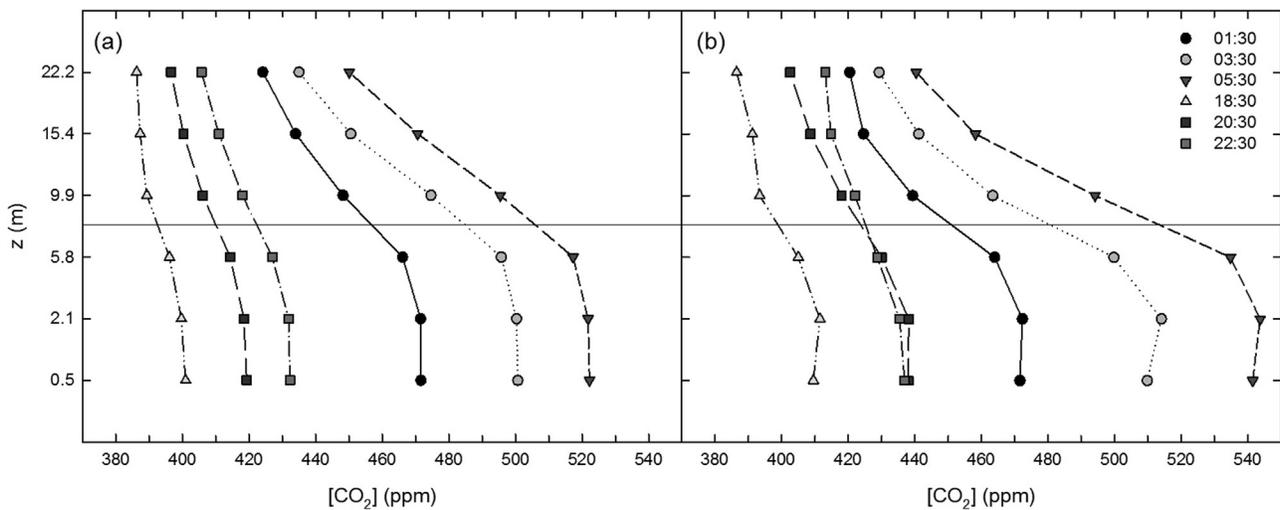
**Figura 5** - Ciclo médio diário da  $[\text{CO}_2]$  no (a) período chuvoso e (b) menos chuvoso, em 2015, Moju-PA. Noite representada com fundo cinza.

equivalente a 14,7 ppm (chuvoso) e 23,0 ppm (menos chuvoso) e mais expressivas nos horários de 01:30, 03:30 e 05:30 (HL), respectivamente 47,5 ppm, 65,7 ppm e 72,2 ppm (chuvoso) e 51,1 ppm, 80,5 ppm e 101,0 ppm (menos chuvoso), sendo observado os maiores valores da [CO<sub>2</sub>] no período menos chuvoso (Figs. 6a e 7b).

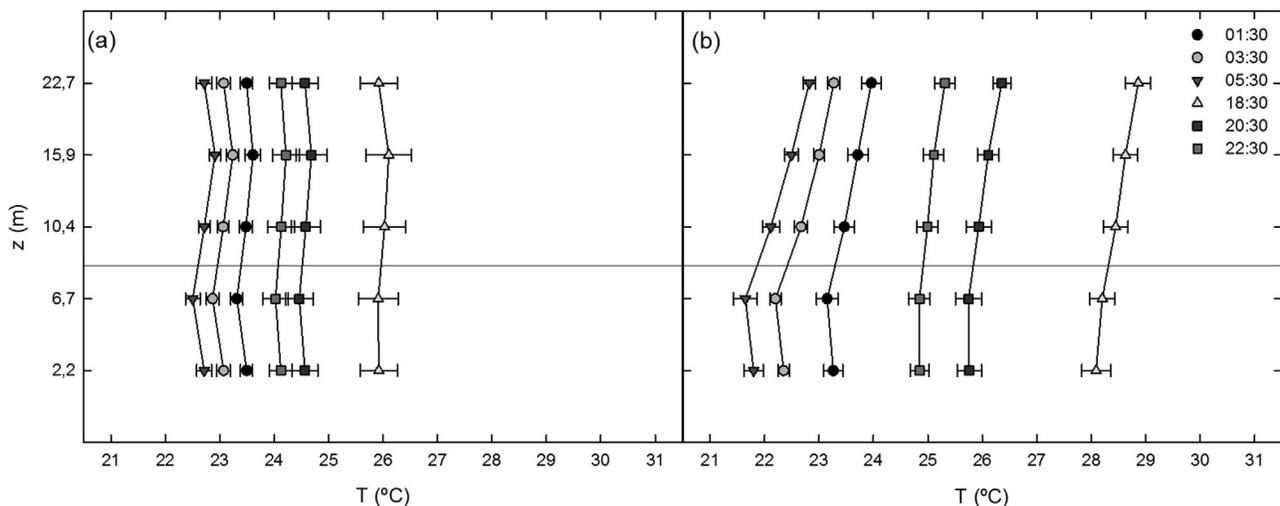
Em estudos sobre a [CO<sub>2</sub>] abaixo do dossel de florestas tropicais (Buchmann *et al.*, 1997; Araújo *et al.*; 2008) também foi demonstrado que os valores da [CO<sub>2</sub>] foram menores no período chuvoso do que no período menos chuvoso. Nesses estudos, essa característica foi atribuída como consequência da redução da mistura turbulenta e do desenvolvimento de inversões estáveis durante as noites no período menos chuvoso, o que concorda com os resultados do perfil vertical de T média em diferentes alturas deste

trabalho, que também demonstraram inversão térmica noturna no período menos chuvoso.

A inversão térmica noturna ocorreu tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. Porém, foi mais intensa no período menos chuvoso, onde foi registrada a maior variação no gradiente vertical de T entre o nível mais alto (22,7 m) e mais baixo (2,2 m), cuja diferença foi igual a 0,7 °C, 0,9 °C e 1,1 °C nos horários de 01:30, 03:30 e 05:30 (HL) respectivamente. A ausência do sol contribuiu para que as camadas de ar permaneçam estáveis durante a noite, promovendo um impedimento físico à troca vertical de CO<sub>2</sub> e contribuindo para maiores valores da [CO<sub>2</sub>] abaixo do dossel (Figs. 7a e 7b). À noite há pouca mistura turbulenta entre superfície e a atmosfera devido à formação da inversão térmica noturna estável, que retém o CO<sub>2</sub> emi-



**Figura 6** - Perfil vertical da [CO<sub>2</sub>] média em diferentes alturas, durante a noite, no (a) período chuvoso e (b) menos chuvoso, em 2015, Moju-PA. Altura média do topo do dossel (8 m) representada pela linha horizontal.



**Figura 7** - Perfil vertical de T média em diferentes alturas, durante a noite, no (a) período chuvoso e (b) menos chuvoso, em 2015, Moju-PA. Altura média do topo do dossel (8 m) representada pela linha horizontal.

tido do solo e da vegetação até o início da atividade turbulenta ao amanhecer (Martens *et al.*, 2004).

#### 4. Conclusões

Em geral, a variação diária e sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> em cultivo de palma de óleo com HIE no leste da Amazônia apresentou características semelhantes no período chuvoso e no período menos chuvoso do ano estudado.

Porém, houve diferença no valor médio máximo de troca de CO<sub>2</sub>, sendo superior no período chuvoso. O intervalo com valores médios diurnos de NEE mais negativos (predomínio da absorção de CO<sub>2</sub>) foi mantido por maior tempo no período chuvoso (3 horas) do que no menos chuvoso (2 horas). Consequentemente, o horário em que o NEE começou a ficar menos negativo (diminuição da absorção de CO<sub>2</sub>) também variou, sendo mais tardio no período chuvoso (em torno de 13:30) e antecipado no período menos chuvoso (por volta de 12:00). Essa diferença sugere uma resposta ecofisiológica da vegetação às condições de seca no leste da Amazônia.

Houve uma tendência de resposta do cultivo de palma de óleo às condições atmosféricas. OC<sub>in</sub> e DPV são dois forçantes meteorológicos que influenciaram os fluxos de CO<sub>2</sub> no ecossistema e apresentaram correlação dos dados diária e sazonalmente no período estudado. Durante a noite, a pouca atividade turbulenta e a inversão térmica contribuíram para maior [CO<sub>2</sub>] no período menos chuvoso, quando ocorreu desacoplamento mais intenso das camadas de ar (acima e abaixo do dossel) e maior impedimento à troca vertical de CO<sub>2</sub>.

#### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo durante a elaboração da dissertação de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFPA/MPEG/EMBRAPA, o que possibilitou a realização deste trabalho. À Embrapa Amazônia Oriental e à Empresa Marborges Agroindústria S.A., especialmente Antônio José de Abreu Pina (gerente agrícola), Bárbara Cristina Santos de Oliveira (graduanda em agronomia), Carlos Edmundo Quaresma (técnico agrícola), pelo apoio técnico e logístico na condução do experimento.

#### Referências

- ALVARENGA, C.B.; TEIXEIRA, M.M.; ZOLNIER, S.; CECON, P.R.; SIQUEIRA, D.L. *et al.* Efeito do déficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 182-193, 2014.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ARAÚJO, A.C.; KRUIJT, B.; NOBRE, A.D.; DOLMAN, A.J.; WATERLOO, M.J. *et al.* Nocturnal accumulation of CO<sub>2</sub> underneath a Tropical Forest Canopy along a topographical gradient. **Ecological Applications**, v. 18, p. 1406-1419, 2008.
- ARAÚJO, A.C.; DOLMAN, A.J.; WATERLOO, M.J.; GASH, J.H.C.; KRUIJT, B. *et al.* The spatial variability of CO<sub>2</sub> storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in Central Amazonia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 226-237, 2010.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. Academic Press. 2 ed., 2001, 420 p.
- AUBINET, M.; GRELLÉ, A.; IBROM, A.; RANNIK, U.; MONCRIEFF, J. *et al.* Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The Euroflux methodology. **Advances in Ecological Research**, v. 30, p. 113-175, 2000.
- ÁVILA, P.L.R.; SOUZA, E.B.; PINHEIRO, A.N.; FIGUEIRA, W.S. Análise da precipitação sazonal simulada utilizando o regcm4 sobre o estado do Pará em anos de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 247-263, 2014.
- BAKER, I.T.; PRIHODKO, L.; DENNING, A.S.; GOULDEN, M.; MILLER, S. *et al.* Seasonal drought stress in the Amazon: Reconciling models and observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, 2008.
- 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.
- BALDOCCHI, D.; CHU, H.; REICHSTEIN, M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: A review. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 520-533, 2017.
- BASTOS, T.X.; MÜLLER, A.A.; PACHECO, N.A.; SAMPAIO, S.M.N.; ASSAD, E.D. *et al.* Zoneamento de riscos climáticos para a cultura do dendêzeiro no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 564-570, 2001.
- BONAL, D.; BOSCH, A.; PONTON, S.; GORET, J.-Y.; BURBAN, B. *et al.* Impact of severe dry season on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana. **Global Change Biology**, v. 14, p. 1917-1933, 2008.
- BRANDO, P.M.; GOETZ, S.J.; BACCINI, A.; NEPSTAD, D.C.; BECK, P.S.A. *et al.* Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, p. 14685-14690, 2010.
- BUCHMANN, N.; GUEHL, J.M.; BARIGAH, T.S.; EHLERINGER, J.R. Interseasonal comparison of CO<sub>2</sub> concentrations, isotopic composition, and carbon dynamics in an Amazonian rainforest (French Guiana). **Oecologia**, v. 110, p. 120-131, 1997.
- CANADELL, J.G.; PATAKI, D.E.; GIFFORD, R.; HOUGHTON, R.A.; LUO, Y. *et al.* Saturation of the terrestrial carbon sink. IN: CANADELL, J.G.; PATAKI, D.; PITELKA, L. (eds). **Terrestrial ecosystems in a changing world**. The IGBP Series, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of oil palm (*Elaeis guineensis*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, p. 629-652, 2011.

- CHAPIN, F.S., MATSON, P.A., MOONEY, H.A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York, Springer, 2002.
- COSTA, A.C.L.; ALMEIDA, S.S.; CARVALHO, C.R.; MEIR, P.; MALHI, Y. *et al.* Experimento Esecافلر - LBA em Caxiuanã. IN: LISBOA, P. L. B. (Org.). **Caxiuanã desafios para a conservação de uma floresta nacional na Amazônia**. Belém: MPEG, v. 1, p. 45-90, 2009.
- DAVIDSON, E.A.; ARAÚJO, A.C.; ARTAXO, P.; BALCH, J.K.; BROWN, I.F. *et al.* The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, p. 321-328, 2012.
- DOUGHTY, C.E.; GOULDEN, M.L. Seasonal patterns of tropical forest leaf area index and CO<sub>2</sub> exchange. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 1-12, 2008.
- DUFRENE, E.; SAUGIER, B. Gas exchange of oil palm in relation to light, vapour pressure deficit, temperature and leaf age. **Functional Ecology**, v. 7, p. 97-104, 1993.
- FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; OLSON, R.; ANTHONI, P.; AUBINET, M. *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, p. 43-69, 2001.
- FRANK, D.; REICHSTEIN, M.; BAHN, M.; THONICKE, K.; FRANK, D. *et al.* Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: Concepts, processes and potential future impacts. **Global Change Biology**, v. 21, p. 2861-2880, 2015.
- FOWLER, D.; NEMITZ, E.; MISZTAL, P.; DI MARCO, C.; SKIBA, U. *et al.* Effects of land use on surface-atmosphere exchanges of trace gases and energy in Borneo: Comparing fluxes over oil palm plantations and a rainforest. **Philosophical Transaction Of The Royal Society B**, v. 366, p. 3196-3209, 2011.
- GUAN, K.; PAN, M.; LI, H.; WOLF, A.; WU, J. *et al.* Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 284-289, 2015.
- GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D.; ROCHA, H.R. Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 1-14, 2006.
- GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D.; ROCHA, H.R.; MENTON, M.C.; FREITAS, H.C. *et al.* Diel and seasonal Patterns of Tropical Forest CO<sub>2</sub> exchange. **Ecological Applications**, v. 14, p. 42-54, 2004.
- HEIMANN, M.; REICHSTEIN, M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. **Nature**, v. 451, n. 17, p. 289-292, 2008.
- HENSON, *i.e.* Carbon assimilation, water use and energy balance of an oil palm plantation assessed using micrometeorological techniques. **Proc. of the 1993 PORIM International Palm Oil Congress - Update and Vision (Agriculture)**. PORIM, Bangi, p.137-158, 1995.
- HENSON, *i.e.* Notes on oil palm productivity II. An empirical model of canopy photosynthesis based on radiation and atmospheric vapour pressure deficit. **Journal Oil Palm Research**, v. 10, n. 2, p. 25-28, 1998.
- HENSON, I.E.; HARUN, M.H. The influence of climatic conditions on gas and energy exchanges above a young oil palm stand in north Kedah, Malaysia. **Journal Oil Palm Research**, v. 17, p. 73-91, 2005.
- HOMMA, A.K.O. Amazônia: criando uma nova natureza. IN: SCARLATO, F.C.; ARAÚJO, W.F.; EVANGELISTA, R.A.O. (Org.). **Amazônia: terra e água-degradação e desenvolvimento sustentável**. Boa Vista: UFRR, p. 101-122, 2012.
- HUETE, A.R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y.E.; RATANA, P.; SALESKA, S.R. *et al.* Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, 2006.
- HUTYRA, L.R., MUNGER, J.W., HAMMOND-PYLE, E., SALESKA, S.R., RESTREPO-COUBE, N. *et al.* Resolving systematic errors in estimates of net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub> and ecosystem respiration in a tropical forest biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1266-1279, 2008.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K. *et al.* Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. **Scientific Reports**, p. 1-7, 2016.
- LAMADE, E.; BOUILLET, J.P. Carbon storage and global change: the role of oil palm. **Oleagineux, Corps Gras, Lipides**, v. 12, p. 154-160, 2005.
- LI, W.; ZHANG, P.; YE, J.; LI, L.; BAKER, P.A. Impact of two different types of El Niño events on the Amazon climate and ecosystem productivity. **Journal of Plant Ecology**, v. 4, p. 91-99, 2011.
- LOPES, M.N.G.; SOUZA, E.B.; FERREIRA, D.B.S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, p. 84-102, 2013.
- MALHI, Y.; NOBRE, A.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M. *et al.* Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 31593-31612, 1998.
- MARTENS, C.S. ; SHAY, T.J.; MENDLOVITZ, H.P.; MATROSS, D.M.; SALESKA, S.R. *et al.* Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: Night-time CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. **Global Change Biology**, v. 10, p. 618-629, 2004.
- MILLER, S.D.; GOULDEN, M.L.; MENTON, M.C.; ROCHA, H.R.; FREITAS, H.C. *et al.* Biometric and micrometeorological measurements of Tropical Forest carbon balance. **Ecological Applications**, v. 14, p. 114-126, 2004.
- MOURA, Y.M.; HILKER, T.; LYAPUSTIN, A.I.; GALVÃO, L.S.; SANTOS, J.R. *et al.* Seasonality and drought effects of Amazonian forests observed from multi-angle satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, p. 278-290, 2015.
- OLIVEIRA, B.C.S.; ARAÚJO, A.C.; OLIVEIRA, L.R.; MANZI, A.O. Caracterização da variação diária e sazonal do CO<sub>2</sub> atmosférico em cultivo da palma de óleo com híbridos inter-respecíficos (*Elaeis guineensis* X *Elaeis oleifera*) no leste da Amazônia. IN: **Workshop Brasileiro de Micrometeorologia**, 9. Anais. Santa Maria-RS, 2015.
- ROCHA, H.R.; GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D.; MENTON, M.C.; PINTO, L.D.V.O. *et al.* Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, p. 22-32, 2004.
- RÖLL, A.; NIU, F.; MEIJIDE, A.; HARDANTO, A.; HENDRAYANTO *et al.* Transpiration in an oil palm landscape: Effects of palm age. **Biogeosciences**, v. 12, p. 5619-5633, 2015.

SALESKA, S.R.; MILLER, S.D.; MATROSS, D.M.; GOULDEN, M.L.; WOFSEY, S.C. *et al.* Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, v. 302, p. 1554-1557, 2003.

VAN SCHAIK, C.P.; TERBORGH, J.W.; WRIGHT, S.J. The phenology of tropical forests - Adaptive significance and consequences for primary consumers. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 24, p. 353-377, 1993.

VON RANDOW, C.; MANZI, A.O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P.J.; ZANCHI, F.B. *et al.* Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

ZERI, M.; SÁ, L.D.A.; MANZI, A.O.; ARAÚJO, A.C.; AGUIAR, R.G. *et al.* Variability of carbon and water fluxes following climate extremes over a Tropical Forest in Southwestern Amazonia. **PLoS ONE**, v. 9, p. 1 -12, 2014.

ZSCHEISCHLER, J.; REICHSTEIN, M.; HARMELING, S.; RAMMIG, A.; TOMELLERI, E. *et al.* Extreme events in gross primary production: A characterization across continents. **Biogeosciences**, v. 11, p. 2909-2924, 2014.

### Endereços de Internet

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET (1980 - 2015). **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 17 abr. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE (2016). **Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2015**. Disponível em: [http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes\\_1988\\_2015n.htm](http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2015n.htm), Acesso em: 15 jan. 2016.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.