

## FLUXOS DE CO<sub>2</sub> EM UMA ÁREA DE FLORESTA TROPICAL ÚMIDA NA AMAZÔNIA OCIDENTAL EM UM ANO DE EL NIÑO

CO<sub>2</sub> fluxes in a wet tropical forest area in Western Amazon in year of El Niño

Bárbara Antonucci<sup>1</sup>, Renata Gonçalves Aguiar<sup>2</sup>, Leonardo José Gonçalves Aguiar<sup>3</sup> e Nara Luísa Reis de Andrade<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil

### Resumo

*O objetivo deste trabalho foi quantificar a variabilidade horária dos fluxos de CO<sub>2</sub> em ano de El Niño, em 2015, em uma floresta tropical úmida na Amazônia Ocidental. Foram analisados dados de fluxos de CO<sub>2</sub> coletados à 63,5 m de altura em uma torre do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia na Reserva Biológica do Jaru, composta por floresta Ombrófila Aberta. Foram utilizados dados do período seco-úmido, por convenção, os valores negativos e positivos indicam absorção e emissão de CO<sub>2</sub>, respectivamente. A absorção de CO<sub>2</sub> na floresta teve níveis mais elevados entre às 9 h 30 e 16 h, com valores médios entre -19 e -13  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , no entanto o pico de absorção ocorreu às 13 h com -30  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , haja vista, que nesse horário os raios solares são mais intensos. Em média, a Rebio Jaru absorveu mais que áreas de transição Amazônia-Cerrado, indicando que as atividades fisiológicas em Florestas Ombrófilas demandam maior quantidade de carbono. O comportamento médio diário do fluxo de CO<sub>2</sub> apresentou maiores valores de absorção durante o período diurno do que de emissão no noturno, sendo um sumidouro de carbono, corroborando a importância da floresta na assimilação do carbono atmosférico.*

**Palavras-chave:** Carbono. Microclima. Variabilidade

### Abstract

*The objective this paper was to quantify the hourly variability of CO<sub>2</sub> fluxes in the year of the El Niño, in 2015, in a tropical rain forest in the Western Amazon. Data of CO<sub>2</sub> fluxes collected at 63.5 m height in a tower of the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia in the Jaru Biological Reserve, composed of the Open Ombrophilous forest, were analyzed. Data from the dry-wet period were used, which by convention, the negative and positive values indicate absorption and emission of CO<sub>2</sub>, respectively. The CO<sub>2</sub> uptake in the forest had higher levels between 9:30 a.m. and 4:00 p.m., with mean values between -19 and -13  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , however the peak absorption occurs at 1:00 p.m. with -30  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , considering that at this time the sun's rays are most intense. In average, the Rebio Jaru absorbs more than the areas of the transition Amazonia-Cerrado, indicating that the physiological activities in Ombrophilous forest require a greater amount of carbon. The average daily behavior of CO<sub>2</sub> fluxes showed higher concentrations of absorption during the day than emissions overnight, behaving as a carbon sink, corroborating the importance of the forest in assimilation of the atmospheric carbon.*

**Keywords:** Carbon. Microclimate. Variability

## 1 Introdução

A Amazônia tem grande importância ambiental devido aos serviços que fornece na regulação do clima e na manutenção dos ciclos biogeoquímicos. Neste ambiente, a fixação do carbono, pelo processo de fotossíntese, ocorre principalmente através da biomassa florestal, enquanto a liberação para a atmosfera, na forma gasosa, deve-se à respiração desses organismos (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2013). No entanto, ainda há muitas incertezas quanto à sua influência na estocagem de dióxido de carbono atmosférico ( $\text{CO}_2$ ) sua variabilidade frente às mudanças climáticas e aos eventos extremos frequentes nos últimos anos.

Em situações normais de sazonalidade, a floresta se comporta como um sumidouro de  $\text{CO}_2$ , absorvendo mais carbono do que liberando e desta forma compensando as emissões de  $\text{CO}_2$  oriundas do desmatamento e das queimadas na região Amazônica (MALHI, 2012). Todavia, quando se intensificam a frequência de eventos extremos, principalmente as secas, a floresta torna-se emissora de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera (ARTAXO et al., 2014), fato justificado pelas restrições nos processos de absorção de  $\text{CO}_2$  em decorrência da dinâmica natural dos regimes de chuva na região, acarretando o estresse hídrico, onde as ocorrências dos eventos de *El Niño* tornam esse processo ainda mais acentuado (GONZALEZ et al., 2013). Neste contexto o mais recente evento na região de acordo com os modelos numéricos de previsão de temperatura do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2016), foi no ano de 2015 de setembro a novembro onde se iniciou a formação do *El Niño*, categorizado como de intensidade fraca com variação de temperatura de  $-0,5\text{ }^\circ\text{C}$  a  $0,5\text{ }^\circ\text{C}$  que persistiu até março de 2016, atingindo o período de maior pluviosidade na região (FRANCA, 2015) e conseqüentemente, alterando-a.

Além disso, Cox et al. (2013) sugerem que as mudanças climáticas podem estar ligadas à degradação da floresta, pois com o aumento das emissões de  $\text{CO}_2$  ocorre a elevação das temperaturas. Desta forma, compreende-se que a realização de estudos que busquem entender o ciclo do carbono e sua variabilidade horária em áreas de florestas é de suma importância para elucidar questões relacionadas à resposta da floresta em relação às variações climáticas da região Amazônica. Assim, este estudo teve o objetivo de quantificar a variabilidade horária dos fluxos de  $\text{CO}_2$  em um ano de *El Niño* em uma floresta tropical úmida na Amazônia Ocidental.

## 2 Material e Métodos

A área em estudo é composta por floresta tropical úmida onde desde 1999 está instalada uma torre micrometeorológica pertencente ao Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (Programa LBA), de 62 m, situada nas seguintes coordenadas  $10^\circ 11' 11,4''\text{S}$ ;  $61^\circ 52' 29,9''\text{W}$ . A Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru) é uma área de proteção integral que atualmente está sob a tutela do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). A vegetação da Rebio Jaru é composta por floresta tropical úmida e 30,30% de sua área está no município de Ji-Paraná (VIEIRA, 2013), com menores proporções em outros municípios como Machadinho D'Oeste e Vale do Anari (figura 1).

A precipitação na região ocorre em sua maioria nos meses de janeiro a abril e outubro a dezembro, com precipitação média anual de 2001 mm (GOMES, et al., 2015). A área possui temperatura média anual de  $22,9\text{ }^\circ\text{C}$  e evapotranspiração média anual de  $3,57\text{ mm d}^{-1}$  (COSTA, et al., 2010).

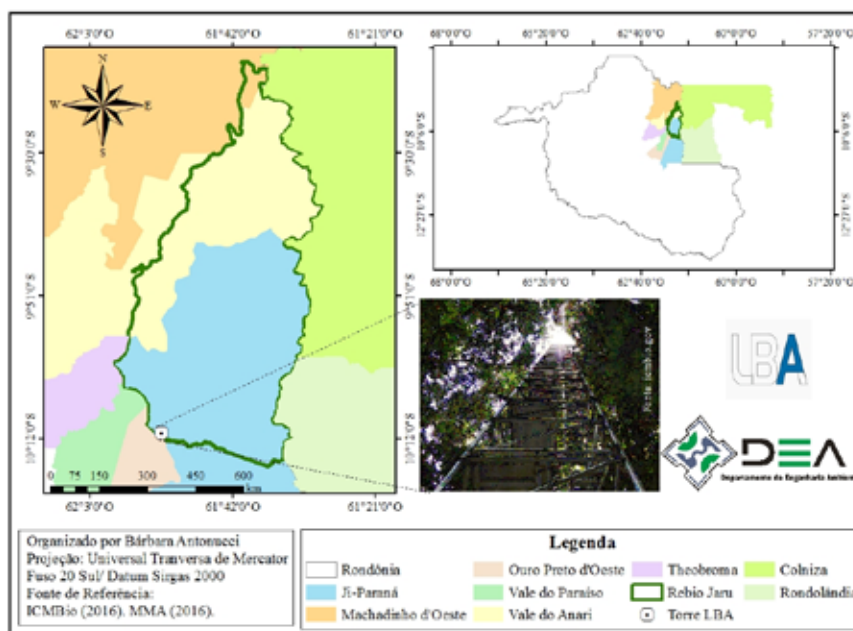


Figura 1 – Localização da Reserva Biológica do Jaru

As medidas dos fluxos de CO<sub>2</sub> foram determinadas pelo método de covariância de vórtices turbulentos com a utilização de um sistema de medidas de alta frequência dos fluxos de superfície instalados à 63,5 m de altura, composto por um analisador de gás por infravermelho de caminho aberto (Modelo Li-7500, IRGA, inc. LI-COR, Lincoln, USA) que mede as concentrações de CO<sub>2</sub> (figura 2a) e um anemômetro sônico tridimensional (Modelo CSAT3, inc. Campbell Scientific Instrument, Utah, USA), que mede as três componentes da velocidade do vento e a temperatura do ar (figura 2b).



Figura 2 – Anemômetro sônico tridimensional (a) e analisador de gás por infravermelho de caminho aberto (b) instalados a 63,5 m de altura

A leitura dos dados de fluxos de CO<sub>2</sub> foi realizada com uma frequência de 10 Hz e os dados brutos foram armazenados a cada 30 min no cartão de memória do Datalogger CR1000 (Campbell Scientific Instrument, Utah, USA), sendo que as coletas foram realizadas quinzenalmente através da troca de cartão de memória.

Os dados utilizados foram referentes ao período seco-úmido correspondendo aos meses de outubro a dezembro, em período posterior a manutenção da torre que estava sem sensor de fluxos até setembro de 2015. Após a coleta, os dados de fluxos de CO<sub>2</sub> passaram por um controle de qualidade no laboratório do LBA, onde foram salvos em planilhas no intuito de verificar os limites e identificar os dados que não correspondiam ao comportamento padrão das variáveis meteorológicas (AGUIAR, 2013), sendo realizada a filtragem dos dados entre os limites de -50 e 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Como indicativo da fotossíntese e da respiração foi utilizada a convenção meteorológica, na qual valores positivos indicam fluxos de CO<sub>2</sub> da vegetação para a atmosfera – respiração – e valores negativos indicam fluxos de CO<sub>2</sub> da atmosfera para a vegetação – fotossíntese – (GOULDEN et al., 2004).

Foi realizada a estatística descritiva dos dados com observação do aproveitamento e comportamento diário e horário, posteriormente fez-se o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, para os dados que não apresentaram normalidade, realizou-se a estatística não-paramétrica, sendo submetidos ao o método *bootstrap* com 1.000 reamostragens, visando encontrar o Intervalo de Confiança (IC) de 95% para as médias e o erro padrão.

### 3 Resultados e Discussão

Os dados de fluxo de CO<sub>2</sub> obtidos para o ano de 2015 apresentados na figura 3, contam somente com o período seco-úmido, com um aproveitamento de 61,1%. As lacunas na série temporal desses dados são atribuídas, essencialmente, à instabilidade no sistema de energia e armazenamento, acarretando a perda de longos períodos de dados, além de períodos destinados à manutenção da torre que porventura geraram as falhas (DIAZ, 2014).

Segundo Baldocchi (2003), falhas nos dados são inevitáveis quando são construídos registros de dados em longo prazo e para os dados de fluxos medidos pelo método de covariância de vórtices turbulentos, o índice de rejeição dos dados no período de um ano é de 35% (FALGE et al., 2001), condizente com o que foi encontrado no presente estudo.

O comportamento típico da concentração de CO<sub>2</sub> mostra um fluxo positivo durante a noite, quando as emissões do solo e a respiração combinam-se como uma fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera e começa a decrescer logo após o nascer do sol quando o

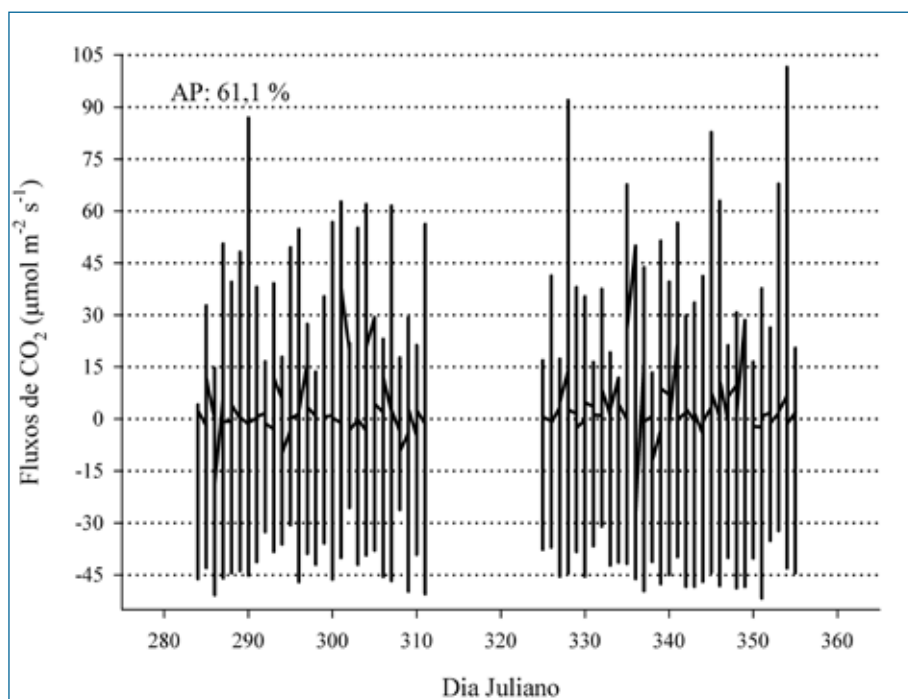


Figura 3 – Aproveitamento dos dados de fluxo de  $\text{CO}_2$  para o período seco-úmido no ano de 2015, Rebio Jaru.

$\text{CO}_2$  atmosférico é absorvido pela vegetação, e as reações fotoquímicas começam a ocorrer de maneira mais intensa (ARAÚJO et al., 2010; GOULDEN et al., 2004).

Observou-se que a absorção de  $\text{CO}_2$  na floresta teve níveis mais elevados entre às 9 h 30 e 16 h, com valores médios situados entre  $-19$  e  $-13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , no entanto, o pico de absorção ocorreu às 13 h com  $-30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , haja vista, que nesse horário os raios solares são mais intensos. Goulden et al. (2004) relataram para o horário de maior irradiância uma absorção média de  $-16$  e  $-19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , na Floresta Nacional do Tapajós. Entretanto, os valores encontrados aqui para a Rebio Jaru e por Goulden et al. (2004) para a Floresta Nacional do Tapajós no horário de maior incidência solar são superiores aos que Gallon, Sanches e Paulo (2006) verificaram em uma floresta de transição Amazônia-Cerrado, nos períodos seco e úmido, valores médios de  $-8$  e  $-6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente, indicando que as atividades fisiológicas em Floresta Ombrófila demandam maior quantidade de carbono.

Em contraste a esse resultado, Saleska et al. (2009) relatam que a região da Bacia Amazônica atua em anos de *El Niño*, a exemplo do ano de 2015, como uma fonte de carbono, devido à maior ocorrência da mortalidade das árvores acarretada pelo aumento da temperatura e a diminuição da água disponível no sistema. De forma distinta aos resultados encontrados por Saleska et al. (2009) e Gallon, Sanches e Paulo (2006), o estudo realizado por Vourlitis et al. (2011) em uma floresta transição evidenciou que as taxas de absorção comparadas entre a estação seca e a chuvosa, nos anos de *El Niño* de 2006-2007 e nos anos normais de 2007-2008 foram semelhantes.

Ressalta-se que outros fatores além da sazonalidade interferem fortemente na variabilidade que existe na dinâmica do carbono de um ecossistema para outro, sendo apontados entre os principais a estrutura florestal e a disponibilidade de água no ambiente.

O fluxo de  $\text{CO}_2$  medido acima do dossel corresponde aos processos de fotossíntese, respiração dos componentes vegetais e do solo, além das trocas no armazenamento que entram na região do dossel, transportados pela turbulência atmosférica nas condições meteorológicas (GRACE et al., 1996). A variação horária que ocorre no início da manhã na floresta, das 6 h até aproximadamente às 9 h (figura 4), é definido segundo Araújo et al. (2010) devido à estabilidade atmosférica nas copas das árvores durante a noite, que ao receber as primeiras incidências solares ocasiona a sua liberação para a atmosfera. Neste estudo, o valor máximo encontrado para o referido fenômeno foi de  $15 [10; 20] \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , às 7h30 (os valores entre os colchetes expressam um intervalo de confiança de 95%, utilizando reamostragem *bootstrap* com 1.000 replicações).

O comportamento médio do fluxo de  $\text{CO}_2$  nos períodos noturno e diurno, apresentou valores de  $3$  e  $-12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente, ou seja, no período noturno ocorreu liberação de carbono e no diurno absorção. No mesmo contexto, Aguiar et al. (2006) encontraram que no período diurno a Rebio Jaru absorvia mais  $\text{CO}_2$ , cerca  $-23,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na estação chuvosa. Andrade et al. (2007) obtiveram resultado semelhante em um estudo realizado no município de Bragança no Pará, onde as variações foram bem caracterizadas no período das 9 h às 16 h, obtendo uma variação horária média do fluxo de  $\text{CO}_2$  no período diurno de  $-11,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

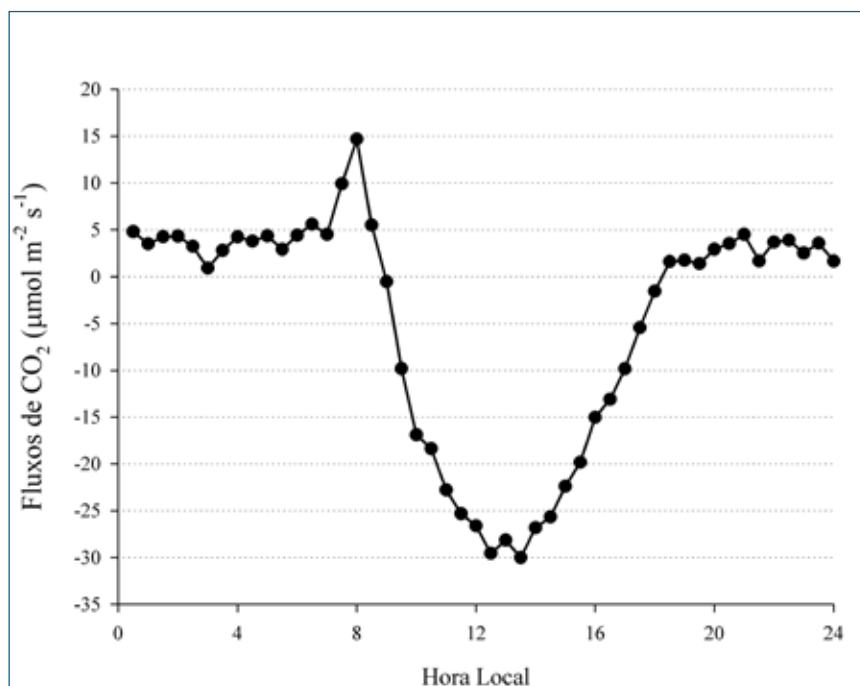


Figura 4 – Fluxos de CO<sub>2</sub> para o período seco-úmido no ano de 2015, Rebio Jaru.

Destaca-se que floresta absorveu mais CO<sub>2</sub> do que liberou no período seco-úmido, fato que corrobora a importância da floresta como sumidouro do carbono atmosférico (GATTI et al. 2014). Entretanto, ainda são necessários estudos mais detalhados para avaliar também o carbono em outras formas armazenado no solo e um aprofundamento de estudos em outras escalas para caracterizar se a floresta atua realmente como um sumidouro (WRIGHT, 2013), visto que, ainda existem muitas incertezas em relação ao papel das florestas tropicais, o que pode levar a superestimar ou subestimar esse comportamento (PHILLIPS; LEWIS, 2014).

#### 4 Conclusões

Ao quantificar as variações do fluxo de CO<sub>2</sub>, foi encontrada maior absorção de CO<sub>2</sub> na floresta entre às 9 h 30 e 16 h. O pico de absorção ocorreu às 13 h no qual se atribui aos raios solares mais intensos. De forma geral, o comportamento médio do fluxo de CO<sub>2</sub> apresentou maiores concentrações de absorção durante o dia do que respiração durante a noite, destacando assim que floresta absorveu mais CO<sub>2</sub> do que liberou no período seco-úmido de um ano de *El Niño*, fato que corrobora a importância da floresta como sumidouro do carbono atmosférico.

#### Agradecimentos

Ao Programa LBA, pelo fornecimento dos dados, ao grupo de pesquisa do Programa LBA em Ji-Paraná, pelo apoio científico, a CAPES, pela concessão de bolsa e a FAPERO, pelo apoio financeiro.

#### Referências

AGUIAR, R. G. Balanço de energia em ecossistema Amazônico por modelo de regressão robusta com bootstrap e validação cruzada [thesis]. Cuiabá: Departamento de Física Ambiental/UFMT; 2013. 85 p.

AGUIAR RG, VON RANDOW C, PRIANTE FILHO N, MANZI AO, AGUIAR LJG, CARDOSO FL. Fluxos de massa e energia em uma Floresta Tropical no Sudoeste da Amazônia. Rev. Bras. Meteorol. 2006;v(21):36-45.

ANDRADE VMS, SILVA MAV, COSTA JMN, OLIVEIRA EC, MALHI Y. Variação dos fluxos de CO<sub>2</sub> e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em ecossistema de manguezal Amazônico na região de Bragança, PA. *Ciência e Natura*. 2007;Edição Especial:121-124.

ARAÚJO AC, DOLMAN AJ, WATERLOO MJ, GASH JHC, KRUIJT B, ZANCHI FB, et al. The spatial variability of CO<sub>2</sub> storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. *Agric. For. Meteorol.* 2010;v(150):226-237.

ARTAXO P, DIAS MAFS, NAGY L, LUIZÃO FJ, CUNHA HB, QUESADA CAN, et al. Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o funcionamento da floresta Amazônica. *Cien. Cult.* 2014;v(6):41-46.

BALDOCCHI D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Glob. Chang. Biol.* 2003;v(9):479-492.

COSTA MH, BIAJOLI MC, SANCHES L, MALHADO ACM, HUTYRA LR, ROCHA HR, et al. Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: Are the wet and seasonally dry rain forests any different? *J. Geophys. Res.* 2010;v(115):1-9.

COX PM, PEARSON D, BOOTH BB, FRIEDLINGSTEIN P, HUNTINGFORD C, JONES CD, et al. Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*.2013;v(494):341-344.

CULF AD, FISCH G, MALHI Y, NOBRE CA. The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest. *Agric. For. Meteorol.* 1997;v(85):149-158.

DIAZ MB. Análise de diferentes métodos de preenchimento de falhas nos fluxos de CO<sub>2</sub>; estimativas sobre o arroz irrigado[dissertation]. Santa Maria: Departamento de Meteorologia/UFSM; 2014. 87 p.

FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R, ANTHONI P, AUBINET M, BERNHOFER C, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agric. For. Meteorol.* 2001;v(107):71-77.

FRANCA RR. Climatologia das chuvas em Rondônia–período 1981-2011. *Revista Geografias*. 2015;v(1):44-58.

GALLON MMP, SANCHES L, PAULO SR. Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel uma Floresta Tropical de Transição Amazônica. *Rev. Bras. Meteorol.* 2006;v(21):291-300.

GATTI LV, GLOOR M, MILLER JB, DOUGHTY CE, MALHI Y, DOMINGUES LG, et al. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*. 2014;v(506):76-80.

GOMES JB, WEBLER AD, AGUIAR RG, AGUIAR LJG, NUÑES ML. A. Conversão de florestas tropicais em sistemas pecuários na Amazônia: quais as implicações no microclima da região? *Revista Brasileira de Climatologia*. 2015;v(11):67-81.

GONZALEZ RA, ANDREOLI RV, CANDIDO LA, KAYANO MT, SOUZA RA. F. A influência do evento El Niño – Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. *Acta Amazon.* 2013;v(43): 469-480.

GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; ROCHA, H. R.; MENTON, M. C.; FREITAS, H. C. FIGUEIRA, A. M. S et al. Diel and seasonal patterns of Tropical Forest CO<sub>2</sub> exchange. *Ecol. Appl.* 2004;v(14):42-54.

GRACE J, LLOYD J, MCINTYRE J, MIRANDA AC, MEIR P, MIRANDA HS. Carbon dioxide flux over Amazonian rain forest. In: Gash JHC, Nobre CA, Roberts JM, Victoria RL, editors. *Amazonian Deforestation and Climate (Water Science)*, 1. ed. New York: Wiley and Sons, 1996. 638 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS [Internet]. São José dos Campos: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (BR) [cited 2016 oct 24]. Condições de neutralidade no Pacífico Equatorial. Available from: <http://enos.cptec.inpe.br/>.

MALHI Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. *J. Ecol.* 2012;v(100):65-75.

PHILLIPS OL, LEWIS SL. Evaluating the tropical forest carbon sink. *Glob. Chang. Biol.* 2014;v(20):2039-2041.

SALESKA S, DA ROCHA H, KRUIJT B, NOBRE A. Ecosystem Carbon Fluxes and Amazonian Forest Metabolism. In: Keller M, Bustamante M, Gash J, Silva Dias P, editors. *Amazonia and Global Change; 2009*; Washington: American Geophysical Union, 2013. p. 389-407.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO [Internet]. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (BR) [cited 2016 oct 24]. *Florestas do Brasil: em resumo – 2013, dados de 2007-2012*. Available from: <http://www.florestal.gov.br/publicacoes/572-florestas-do-brasil-em-resumo-2013>.

VIEIRA, V. R. Geotecnologias aplicadas à estruturação de um sistema de informação geográfica da olericultura, Ji-Paraná-RO [monography]. Ji-Paraná : Departamento de Engenharia Ambiental/UNIR, 2013.

VOURLITIS GL, LOBO FA, ZEILHOFER P, NOGUEIRA JS. Temporal patterns of net CO<sub>2</sub> exchange for a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin. *J. Geophys. Res.* 2011;v(116):1-15.

WRIGHT SJ. The carbon sink in intact tropical forests. *Glob. Chang. Biol.* 2013;v(19):337-339.

Bárbara Antonucci

Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil  
E-mail: [barbara.antonucci@usp.br](mailto:barbara.antonucci@usp.br)

Nara Luísa Reis de Andrade

Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, Brasil  
E-mail: [naraluisar@gmail.com](mailto:naraluisar@gmail.com)

Renata Gonçalves Aguiar

Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, Brasil  
E-mail: [rgaguiar@gmail.com](mailto:rgaguiar@gmail.com)

Leonardo José Gonçalves Aguiar

Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil  
E-mail: [veraneiro@yahoo.com.br](mailto:veraneiro@yahoo.com.br)