

## Edição especial

# Variabilidade do fluxo de isopreno na Amazônia central: simulações com modelo Megan

Variability of isoprene emissions in central Amazon: simulations using the Megan model

Anne Cristiny Santos de Mendonça<sup>I</sup> , Eliane Gomes Alves<sup>II</sup> 

<sup>I</sup> Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil

<sup>II</sup> Max Planck Institute of Biochemistry, Jena, Alemanha

## RESUMO

Investigamos a variabilidade sazonal e intra-anual dos fluxos de isopreno na Amazônia central por meio de simulações com o Modelo de Emissões de Gases e Aerossóis da Natureza (MEGAN 2.1). Para isso, utilizamos dados observacionais de temperatura do ar, radiação solar e índice de área foliar fracionado em diferentes idades foliares (novas, em crescimento, maduras e senescência). Adicionalmente, avaliamos a influência da temperatura e da radiação solar nas estimativas de emissão. Nossos resultados mostram que os maiores fluxos de isopreno ocorrem no período seco e na transição seco-chuvoso, corroborando com a variabilidade da radiação e da temperatura do ar no sítio experimental estudado. Entretanto, tais fatores ambientais não explicam toda a variação dos fluxos, demonstrando que outros agentes (i.e biológicos) também podem estar associados às emissões de isopreno na Amazônia.

**Palavras-chave:** Floresta tropical; Compostos orgânicos voláteis; Forçantes de emissão

## ABSTRACT

We investigated the seasonal and intra-annual variability of isoprene emissions in central Amazon using the Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN 2.1). For that, we used observational data of air temperature, solar radiation and leaf area index fractionated into age classes (new, growing, mature and senescing). Additionally, we evaluated the effect of air temperature and solar radiation on isoprene emissions. Our results showed that the highest isoprene fluxes were observed during the dry season and dry-wet transition, consistent with the variability of radiation and air temperature at the experimental site. However, such environmental factors cannot explain the variation of isoprene flux fully, suggesting that other agents (i.e. biological) may also be associated with the seasonal changes in isoprene emissions in central Amazon.

**Keywords:** Tropical forests; Biogenic volatile organic compounds; Emission drivers

## 1 INTRODUÇÃO

A biosfera produz uma gama diversificada de elementos químicos, e é a maior contribuinte dos compostos orgânicos voláteis biogênicos (BVOCs, na sigla em inglês). Os BVOCs são emitidos para a atmosfera e impactam substancialmente a química atmosférica, promovendo feedbacks complexos sobre o clima (Guenther *et al.*, 2006, Guenther *et al.*, 2012). Eles possuem diversas funções em múltiplas escalas, desde proteção e defesa celular no nível foliar, até influenciar a precipitação na escala dos ecossistemas (Yáñez-Serrano *et al.*, 2020).

Apesar da identificação de centenas de BVOCs, dois compostos dominam o fluxo global anual para a atmosfera: o isopreno e o metano (Guenther *et al.*, 2006). O metano é um composto de vida longa (anos) com uma distribuição relativamente bem misturada em toda a atmosfera, o que torna suas estimativas relativamente certas. Por outro lado, a magnitude da emissão de isopreno é objeto de muita especulação. O isopreno tem vida curta (minutos a horas), com concentrações atmosféricas que variam em diferentes ordens de magnitude em escala de tempo inferior a um dia e em escalas espaciais menores que alguns quilômetros (Guenther *et al.*, 2006). Destarte, o isopreno atmosférico influencia na produção fotoquímica de ozônio troposférico, na capacidade oxidativa da atmosfera, na formação de aerossóis orgânicos secundários e no ciclo do carbono (Karl *et al.*, 2010, Pacifico *et al.*, 2012, FU *et al.*, 2010, Kesselmeier *et al.*, 2002).

Estima-se que as folhagens de plantas terrestres emitem em torno de 90% do isopreno atmosférico (Guenther *et al.*, 1995) e plantas emissoras de isopreno são encontradas tipicamente em florestas tropicais. Isso torna a floresta Amazônica uma das fontes mais importantes de isopreno para a atmosfera global, devido à sua maior contribuição territorial. Contudo, ainda há incertezas quanto ao mecanismo de liberação destes compostos e aos diversos fatores que influenciam a emissão pelas plantas, assim como quanto à quantidade e distribuição de espécies de plantas que emitem isopreno, e qual a magnitude e variabilidade da emissão (Alves *et al.*, 2018).

Estudos observacionais sobre emissões de isopreno na Amazônia ainda são escassos devido à acessibilidade, dificuldades logísticas, restrições de energia e, principalmente, devido à heterogeneidade da floresta. Apesar disso, diversos avanços têm sido alcançados por meio de campanhas e projetos como LBA, GoAmazon e ATTO (ver mais detalhes em Yáñez-Serano *et al.*, 2020). Por outro lado, emissões de BVOCs podem ser simuladas por meio do Modelo de Emissões de Gases e Aerossóis da Natureza (MEGAN) (Guenther *et al.*, 2012). Tal modelo é amplamente utilizado na comunidade científica e foi projetado para estimar as taxas de emissão espacial e temporal de diversos elementos químicos oriundos de ecossistemas terrestres (Guenther *et al.*, 2012).

Neste trabalho, analisamos a variação sazonal e intra-anual do fluxo de isopreno de um sítio florestal localizado na Amazônia central. Para tanto, realizamos simulações com modelo MEGAN e correlacionamos tais resultados com os fatores ambientais medidos em campo (radiação solar e temperatura).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Usamos dados coletados na Reserva Biológica do Cuieiras ou ZF2, localizada em uma extensa área de platô (150 m acima do nível do mar) a cerca de 60 km a noroeste da cidade de Manaus-AM (Araújo *et al.*, 2002), a qual faz parte da Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). O EEST é coberto principalmente por uma floresta de terra firme de dossel fechado, com alta diversidade de espécies arbóreas e sub-bosque denso (Marra *et al.*, 2014).

A vegetação é típica de floresta tropical primária não perturbada, bastante diversificada no aspecto florístico, com uma quantidade considerável de árvores relativamente altas e delgadas. O dossel é uniforme e possui aspecto rugoso, com copas globosas, próximas umas das outras, resultando na pouca passagem de luz para os estratos inferiores (Oliveira *et al.*, 2008). De acordo com Marra *et al.* (2014), a densidade de árvores que apresentavam diâmetro à altura do peito (DAP),  $\geq 10$  cm na

EEST é de  $593 \pm 28$  árvores  $\text{ha}^{-1}$  (média  $\pm$  intervalo de confiança 99%). Árvores com DAP igual a 100 cm são raras ( $<1$  indivíduo  $\text{ha}^{-1}$ ) e aquelas com DAP  $> 60$  cm representam apenas 16,7% da biomassa acima do solo. A temperatura média anual na EEST foi de  $27^\circ \text{C}$  e a precipitação média anual foi de 2365 mm no período de 1971 a 2000. Há uma estação seca distinta, de julho a setembro, geralmente com menos de 100 mm de chuva por mês (Negrón-Juárez *et al.*, 2017).

Os fluxos de isopreno foram estimados por meio do modelo MEGAN versão 2, uma dimensão em Excel. Para tais simulações, consideramos dados de janeiro a dezembro de 2009 medidos por meio de sensores instalados na torre K34 ( $2^\circ 36'S$ ,  $60^\circ 12'W$ , altitude 130 m), de 54 m de altura, localizada na EEST (para mais detalhes consultar Alves *et al.*, 2018). Utilizamos medições de temperatura do ar (K) e radiação solar de onda curta ( $\text{W m}^{-2}$ ) em um intervalo de 60 minutos. Também consideramos dados mensais de índice de área foliar (IAF) total combinado com IAF fracionado em diferentes idades foliares (novas, em crescimento, maduras e senescência), obtidos por câmeras instaladas na K34. Assim como, atribuímos ao modelo os seguintes parâmetros: fração de cobertura de vegetação igual a 1 (um), tipo funcional de planta igual a 4 (broadleaf evergreen tropical tree) e que a temperatura da folha é igual a temperatura do ar. Quanto à concentração de  $\text{CO}_2$ , adotamos um valor de 380 ppm durante toda a simulação. As demais variáveis, como umidade ( $\text{g kg}^{-1}$ ), velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e umidade no solo ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ), foram ignoradas na simulação.

De acordo com (Guenther *et al.*, 2012) as taxas de emissão do MEGAN ( $F_i$ ) são dadas em escala de paisagem, de acordo com Equação 1:

$$F_i = \gamma_i \sum \varepsilon_{ij} X_j \quad (1)$$

No qual:

$\gamma_i$  é o fator de atividade de emissão;

$\varepsilon_{ij}$  é o fator de emissão em condições normais para classes de compostos  $i$  e para tipo de vegetação  $j$ , com área de cobertura em célula de grade fracionária  $X_j$ ;

O fator de atividade de emissão ( $\gamma_i$ ) é responsável pelos processos que controlam as respostas de emissão às condições ambientais e fenológicas (Guenther *et al.*, 2012). Tal fator é proporcional à resposta de emissão ( $\gamma_p$ ), temperatura ( $\gamma_T$ ), idade foliar ( $\gamma_A$ ), umidade no solo ( $\gamma_{SM}$ ), índice de área foliar (LAI), inibição de CO<sub>2</sub> ( $\gamma_{CO_2}$ ) e coeficiente de ambiente do dossel ( $C_{CE} = 0.57$ ), como mostra a Equação 2:

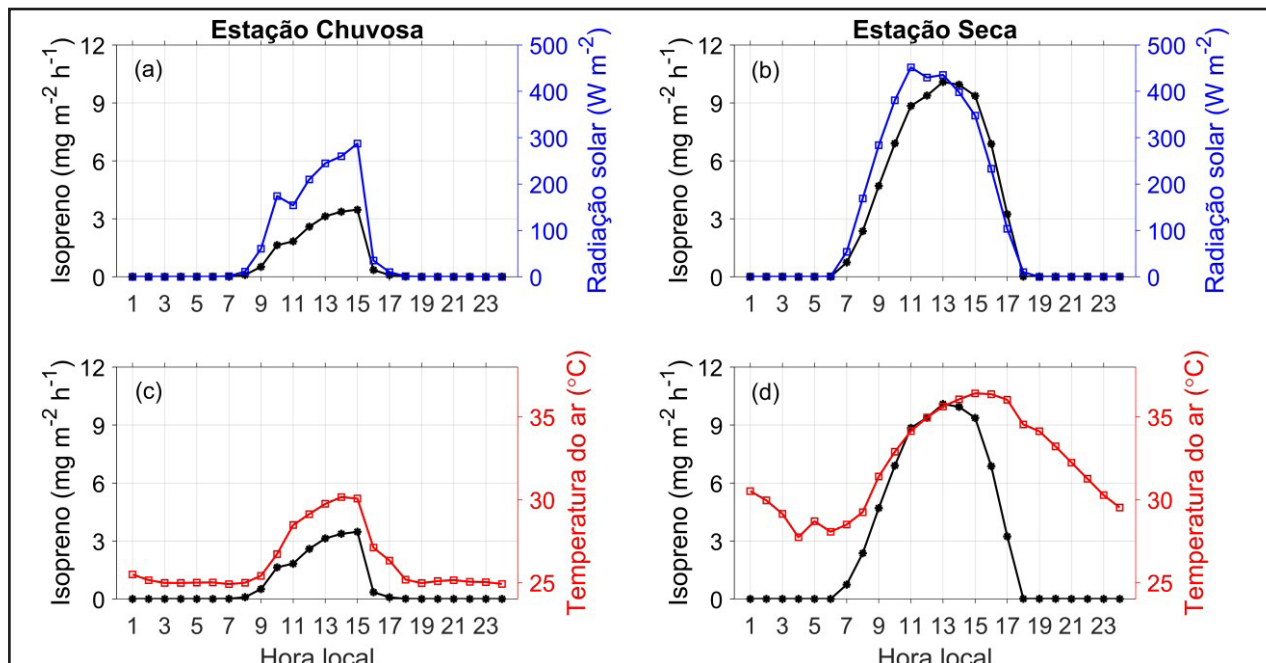
$$\gamma_i = \gamma_p \gamma_T \gamma_A \gamma_{SM} LAI \gamma_{CO_2} C_{CE} \quad (2)$$

Assim, para verificar a variabilidade sazonal dos fluxos de isopreno modelados com o MEGAN, selecionamos os dias 05/03/2009 e 06/09/2009 como representativos da estação chuvosa e seca, respectivamente. Para a análise intra- anual, calculamos médias mensais dos fluxos a partir do output do modelo, considerando o intervalo entre 06 e 18 hora local. Adicionalmente, efetuamos análises estatísticas para determinação do coeficiente de correlação entre os fluxos de isopreno modelados e as variáveis ambientais (como temperatura do ar e radiação solar).

### 3 RESULTADOS

Simulamos os fluxos de isopreno com modelo MEGAN para um dia representativo da estação seca e da estação chuvosa. O valor máximo do fluxo de isopreno no dia chuvoso foi de 3,0 mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> (Figura 1a), medida aproximadamente três vezes menor em comparação ao dia seco (Figura 1b). Este resultado pode estar associado às diferenças na cobertura de nuvens sob o sítio, a qual possibilita que uma maior quantidade de radiação solar atinja o dossel florestal durante o período seco. Neste período, a radiação solar de onda curta ( $R_{SW}$ ) atingiu máximo de 452 Wm<sup>-2</sup>, enquanto que no período chuvoso o valor máximo foi aproximadamente 36% menor (Fig. 1a e Fig. 1b). Ademais, a variação dos fluxos de isopreno está em fase com  $R_{SW}$ , cuja correlação foi positiva e variou entre 0,98 (chuvoso) e 0,95 (seco), apresentando picos entre 1100 e 1500 hora local.

Figura 1 – Variação sazonal do fluxo de isopreno modelados pelo MEGAN (linha preta), e radiação solar de onda curta (linha azul) e temperatura do ar (linha vermelha) medidas na ZF2



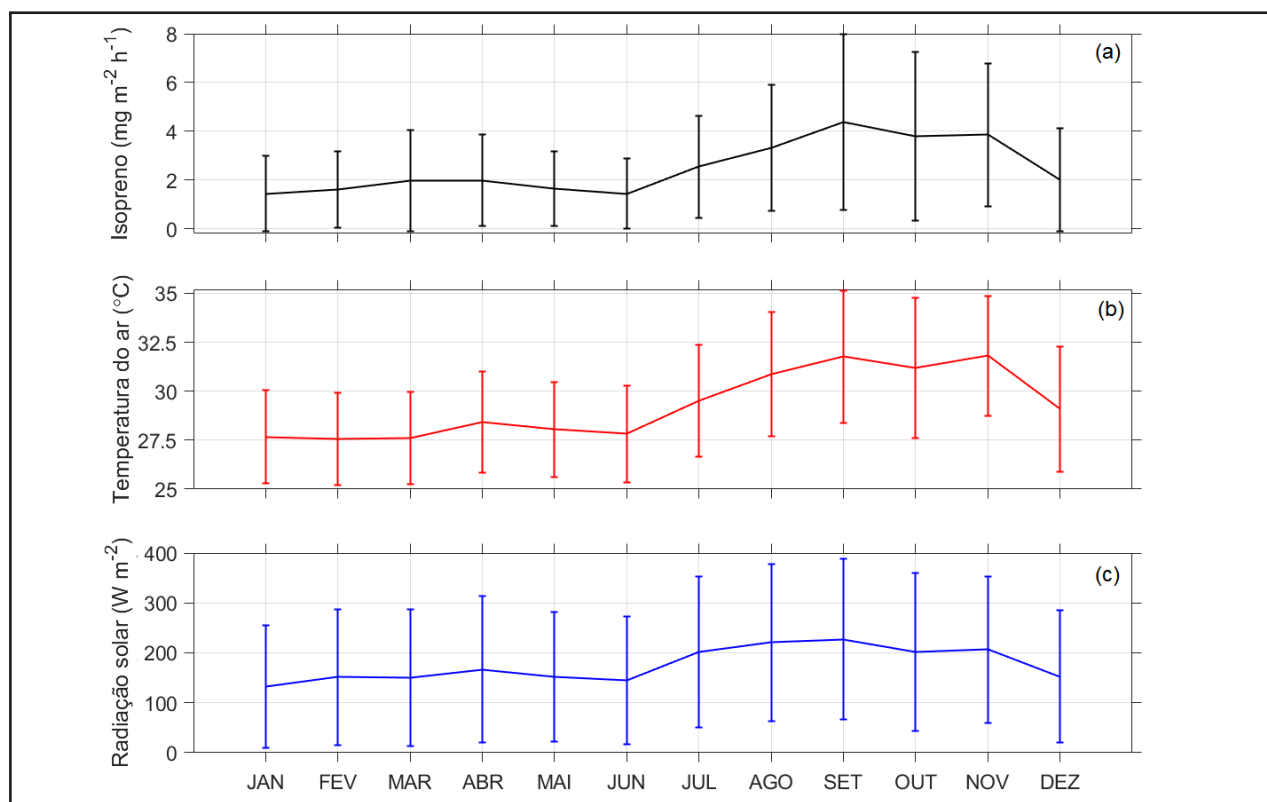
Fonte: Autores/as (2022)

Legenda: Valores referentes à (a, c) um dia chuvoso e (b, d) um dia seco do ano de 2009

Alterações nos valores de  $R_{SW}$  controlam as mudanças de temperatura do ar (T), cuja diferença entre os valores máximo e mínimo foi de 5° C no dia chuvoso (Figura 1c) e 9° C no dia seco (Figura 1d). Tal padrão também contribuiu para variabilidade dos fluxos de isopreno modelados pelo MEGAN. Entretanto, a correlação entre T e os fluxos de isopreno foi maior no dia chuvoso (0,93) do que no dia seco (0,50).

No que concerne às médias mensais dos fluxos de isopreno (Figura 2a), o MEGAN simulou valores de aproximadamente  $2,0 \pm 2,0$  mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> (média  $\pm$  desvio padrão) entre os meses de dezembro a junho. Já nos meses de julho, agosto e setembro, houve um aumento nos fluxos de isopreno dos quais o maior pico ocorreu em setembro (estação seca) atingindo  $4,4 \pm 3,6$  mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>. Tal comportamento também foi observado nos valores de T (Fig. 2b) e  $R_{SW}$  (Fig. 2c), cuja correlação média com os fluxos de isopreno foi de 0,62 e 0,77, respectivamente.

Figura 2 – Variação média intra-anual do (a) fluxo de isopreno estimados pelo MEGAN, (b) temperatura do ar e (c) radiação solar de onda curta medidas na ZF2 no ano de 2009



Fonte: Autores/as (2022)

Legenda: Barras verticais indicam o desvio padrão em relação à média

## 4 CONCLUSÃO

Nesse estudo analisamos a variabilidade sazonal e intra-anual dos fluxos de isopreno na Amazônia central, bem como o efeito da temperatura do ar e da radiação solar nessas emissões. Nossos resultados são baseados em simulações do modelo MEGAN para o ano de 2009. Ao analisar o comportamento sazonal, evidenciamos uma correlação positiva entre os fluxos de isopreno e a radiação solar, consequentemente, no dia seco as emissões de isopreno foram aproximadamente três vezes maiores que no dia chuvoso. Padrão semelhante foi observado em termos médios mensais, em que as maiores emissões ocorreram durante a estação seca e início da estação de transição seca-chuvosa.

O aumento das emissões de isopreno foi associado ao aumento da temperatura do ar e da radiação solar, mas nem toda variabilidade dos fluxos pode ser explicada por tais fatores. Isso mostra que o modelo MEGAN ainda apresenta incertezas que podem estar associadas tanto a enorme biodiversidade da Amazônia quanto aos efeitos de velocidade do vento e umidade do solo (não consideradas na simulação). Portanto, para melhor compreensão das emissões de isopreno na Amazônia são necessárias medidas mais detalhadas dos processos, o que contribuirá para melhorar os modelos levando também a um maior entendimento dos feedbacks entre os processos.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo. Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), ao Programa de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) por todo suporte e disponibilização dos dados de temperatura e radiação solar, e também a todos envolvidos que participaram e contribuíram para a obtenção dos dados utilizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALVES, E. G.; TÓTA, J.; TURNIPSEED, A.; GUENTHER, A. B.; BUSTILLOS, J. O. W. V.; SANTANA, A.; CIRINO, G. G.; TAVARES, J. V.; LOPES, A. P.; NELSON, B. W. *et al.* Leaf phenology as one important driver of seasonal changes in isoprene emissions in central amazonia. **Biogeosciences**, Copernicus GmbH, v. 15, n. 13, p. 4019–4032, 2018.

ARAÚJO, A. C.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; RANDOW, C. von; MANZI, A. O.; CULF, A. D.; GASH, J. H. C.; VALENTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central amazonian rainforest: The manaus lba site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v.107, n. D20, p. LBA 58–1–LBA 58–20, 2002.

FU, P.; KAWAMURA, K.; KANAYA, Y.; WANG, Z. Contributions of biogenic volatile organic compounds to the formation of secondary organic aerosols over mt. tai, central east china. **Atmospheric Environment**, Elsevier, v. 44, n. 38, p. 4817–4826, 2010.



GUENTHER, A.; HEWITT, C. N.; ERICKSON, D.; FALL, R.; GERON, C.; GRAEDEL, T.; HARLEY, P.; KLINGER, L.; LERDAU, M.; MCKAY, W. et al. A global model of natural volatile organic compound emissions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 100, n. D5, p. 8873–8892, 1995.

GUENTHER, A.; JIANG, X.; HEALD, C. L.; SAKULYANONTVITTAYA, T.; DUHL, T. A.; EMMONS, L.; WANG, X. The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (megan2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. **Geoscientific Model Development**, Copernicus GmbH, v. 5, n. 6, p. 1471–1492, 2012.

GUENTHER, A.; KARL, T.; HARLEY, P.; WIEDINMYER, C.; PALMER, P. I.; GERON, C. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using megan (model of emissions of gases and aerosols from nature). **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 6, n. 11, p. 3181–3210, 2006.

KARL, T.; HARLEY, P.; EMMONS, L.; THORNTON, B.; GUENTHER, A.; BASU, C.; TURNIPSEED, A.; JARDINE, K. Efficient atmospheric cleansing of oxidized organic trace gases by vegetation. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 330, n. 6005, p. 816–819, 2010.

KESSELMEIER, J.; CICCIOLO, P.; KUHN, U.; STEFANI, P.; BIESENTHAL, T.; ROTTENBERGER, S.; WOLF, A.; VITULLO, M.; VALENTINI, R.; NOBRE, A. *et al.* Volatile organic compound emissions in relation to plant carbon fixation and the terrestrial carbon budget. **Global Biogeochemical Cycles**, Wiley Online Library, v. 16, n. 4, p. 73–1, 2002.

MARRA, D. M.; CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N.; TRUMBORE, S. E.; RIBEIRO, G. H. P. M.; SANTOS, J. dos; NEGRÓN-JUÁREZ, R. I.; REU, B.; WIRTH, C. Large-scale wind disturbances promote tree diversity in a central amazon forest. **PLOS ONE**, Public Library of Science, v. 9, n. 8, p. 1–16, 08 2014.

NEGRÓN-JUÁREZ, R. I.; JENKINS, H. S.; RAUPP, C. F. M.; RILEY, W. J.; KUEPPERS, L. M.; MARRA, D. M.; RIBEIRO, G. H. P. M.; MONTEIRO, M. T. F.; CANDIDO, L. A.; CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N. Windthrow variability in central amazonia. **Atmosphere**, v. 8, n. 2, 2017. ISSN 2073- 4433.

OLIVEIRA, A. N. d.; AMARAL, I. L. d.; RAMOS, M. B. P.; NOBRE, A. D.; COUTO, L. B.; SAHDO, R. M. Composição e diversidade florístico-estrutural de um hectare de floresta densa de terra firme na amazônia central, amazonas, brasil. **Acta amazônica**, SciELO Brasil, v. 38, n. 4, p. 627– 641, 2008.

PACIFICO, F.; FOLBERTH, G.; JONES, C.; HARRISON, S.; COLLINS, W. Sensitivity of biogenic isoprene emissions to past, present, and future environmental conditions and implications for atmospheric chemistry. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 117, n. D22, 2012.

YÁÑEZ-SERRANO, A. M.; BOURTSOUKIDIS, E.; ALVES, E. G.; BAUWENS, M.; STAVRAKOU, T.; LLUSIÀ, J.; FILELLA, I.; GUENTHER, A.; WILLIAMS, J.; ARTAXO, P. *et al.* Amazonian biogenic volatile organic compounds under global change. **Global change biology**, Wiley Online Library, v. 26, n. 9, p. 4722–4751, 2020.

## Contribuições de autoria

### 1. Anne Cristiny Santos de Mendonça

Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente, INPA/UEA.

<https://orcid.org/0000-0002-7524-8073> • [anne.demendonca@outlook.com](mailto:anne.demendonca@outlook.com)

Contribuição: Investigação, Visualização de dados, Escrita – Primeira Redação, Revisão e Edição

### 2. Eliane Gomes Alves

Instituto Max Planck de Biogeoquímica, Jena, Alemanha.

<https://orcid.org/0000-0001-5396-6536> • [elianegomes.alves@gmail.com](mailto:elianegomes.alves@gmail.com)

Contribuição: Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição

## Como citar este artigo

MENDONÇA, A C. S. de; ALVES, E G. Variabilidade do fluxo de isopreno na Amazônia Central: simulações com modelo Megan. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 45, n. esp. 2, e75410, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X75410>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/75410>. Acesso em: dia mês abreviado ano.