

O EFEITO DAS MUDANÇAS DE USO DA TERRA NAS EMISSÕES DE CO₂ NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Luciano Marani¹, Luciana V. Gatti², Raiane A. Lopes Neves³, Stéphane P. Crispim⁴, Lucas G. Domingues⁵ e Caio S. C. Correia⁶

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Laboratório de Gases de Efeito Estufa

¹lmarani@gmail.com, ²luciana.gatti@inpe.br / lvgatti@gmail.com, ³raiane.lopesneves@gmail.com,

⁴stephane.crispim@gmail.com, ⁵lgtdomingues@gmail.com, ⁶cacorreia@gmail.com

1. Introdução

A Floresta Amazônica desempenha um papel importante para o clima tropical da América do Sul, em particular para a recirculação do vapor d'água para a atmosfera ao longo da corrente de ar principal da bacia amazônica (Salati et al., 1979; Martinelli et al., 1996; Silva Dias et al., 2002; Spracklen et al., 2012). A Bacia também é um componente importante do ramo tropical das circulações globais de Hadley e Walker. As florestas são, além disso, uma potencial fonte de carbono (~100 PgC em biomassa acima do solo, Feldpausch et al. 2012), que, se fosse liberado totalmente contribuiria significativamente com o aquecimento global (na ordem de 0.5°C). Os feedbacks entre florestas tropicais e clima podem ser importantes para o clima global nas próximas décadas (Oyama and Nobre, 2003).

A bacia Amazônica cobre uma das maiores áreas florestais do globo, com cerca de 8 milhões de km², constituindo o maior reservatório de carbono orgânico superficial e comportando um quarto da biodiversidade global (Malhi e Philips, 2005; Gloor et. al., 2013). Está sob forte pressão humana, através de exploração madeireira, conversão de floresta e outras formas de exploração de recursos. Alguns modelos projetam grandes reduções na biomassa superficial, incluindo a transição da Amazônia Oriental de floresta para savana. Independentemente da exatidão destas predições, o tamanho do reservatório de carbono Amazônico implica em um potencial significativo de acoplamento entre o ciclo de carbono da Amazônia, clima global e conteúdo global de Gases de Efeito Estufa (CO₂, CH₄ e N₂O).

Neste trabalho, apresentamos uma forma de examinar qualitativamente a emissão de carbono na Amazônia, ao realizar perfis verticais de CO₂ e outros Gases de Efeito Estufa regularmente (Miller et al., 2007; D'Amelio et al., 2009; Gatti et al., 2010; Gatti et al., 2014) que sejam representativos de escalas regionais (~10⁵–10⁶ km²). Mesmo que o local de realização dos perfis apresentado seja sensível apenas a uma parte da bacia, os resultados sugerem uma forma

de obter fluxos representativos na escala da bacia que sejam robustos e integrados. Aqui apresentamos os resultados destas medidas realizadas na Amazônia Oriental, próximo a Santarém, no estado do Pará, desde dezembro de 2000. Ao combinar estas medidas com os registros de *background* medidos para o CO₂ pela NOAA/ESRL nas Ilhas de Barbados e de Ascensão, estimamos o comportamento da emissão de CO₂ para cerca de 20% da Amazônia Brasileira (~5x10⁶ km²).

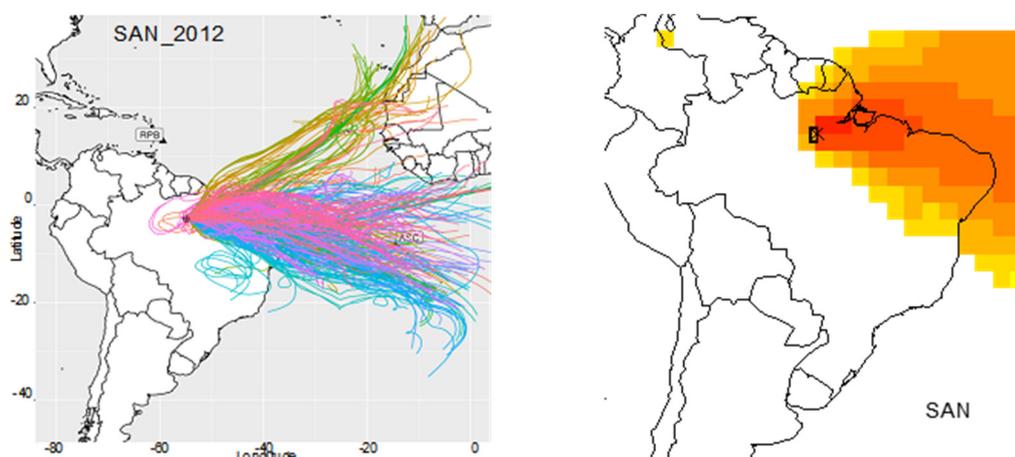
Palavras chave: Balanço de Carbono, Amazônia, Efeito Estufa, Mudanças Climáticas.

2. Metodologia

As medidas de perfis verticais de GEE com aviões de pequeno porte reportados neste trabalho tiveram início em dezembro de 2000, com voos sobre a Floresta Nacional de Tapajós, no estado do Pará, Brasil (2°51'42" S, 54°57'54" O), na altura do Km 67 da Rodovia BR-163, que liga Santarém a Cuiabá. Este local, mostrado na Figura 1, será referido neste trabalho como SAN.

Entre dezembro de 2000 e dezembro de 2018 foram medidos 253 perfis verticais de CO₂. As amostras de ar foram coletadas com um sistema portátil de amostragem, que consiste em uma unidade contendo o sistema de compressão (PCP) e outra unidade contendo 12 ou 17 frascos de amostragem de 700 mL (PFP). Estas unidades são embarcadas em uma aeronave de pequeno porte. O ar ambiente é aspirado através de um tubo de amostragem (Bevaline - 3/8" o.d., 1/4" i.d.) posicionado externamente na janela da asa direita, a cerca de 1 metro da cabine. Desde 2007, sensores GPS e de temperatura e umidade relativa também foram ligados à PCP. O piloto inicia a amostragem à altitude pré-programada usando um controle.

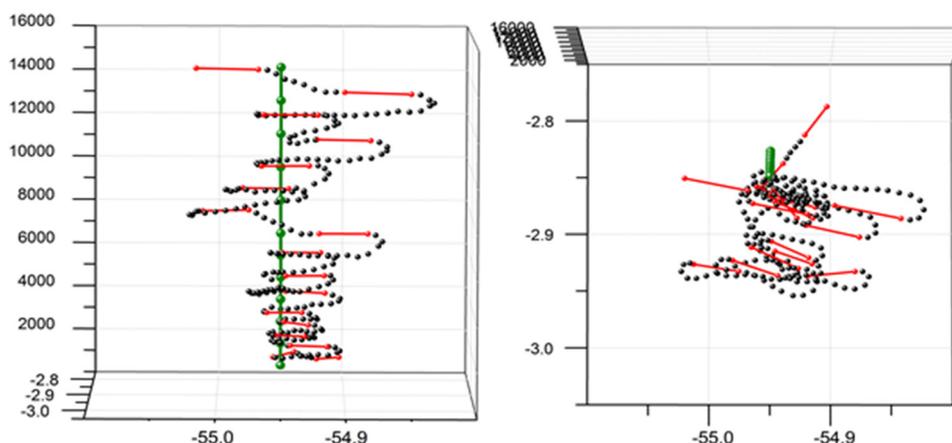
Figura 1 – Localização do ponto de amostragem (SAN) e as trajetórias retrocedentes das massas de ar (Modelo HYSPLIT) para cada frasco coletado durante o ano de 2012 (esquerda) e área de influência média determinada a partir da densidade das trajetórias para os perfis de avião coletados em SAN (direita).



Fonte: Autores

Entre 2000 e 2006, os voos consistiram em um perfil descendente e um ascendente de 3600 m a 300 m de altitude. Desde então, as amostras passaram a ser coletadas durante um perfil helicoidal descendente (Figura 2) de aproximadamente 14.500 pés (4400 m) a até 1000 pés (300 m) acima do nível do mar, próximo à cidade de Santarém.

Figura 2 – Representação da coleta (vista em altitude, e visão superior) em espiral descendente para determinação do perfil vertical de GEE, de 14500 pés até 1000 pés. As linhas vermelhas mostram a trajetória e a duração da amostragem em cada nível, enquanto os pontos pretos mostram a trajetória da aeronave entre a amostragem de cada frasco do perfil, enquanto a barra verde representa a programação da coleta.



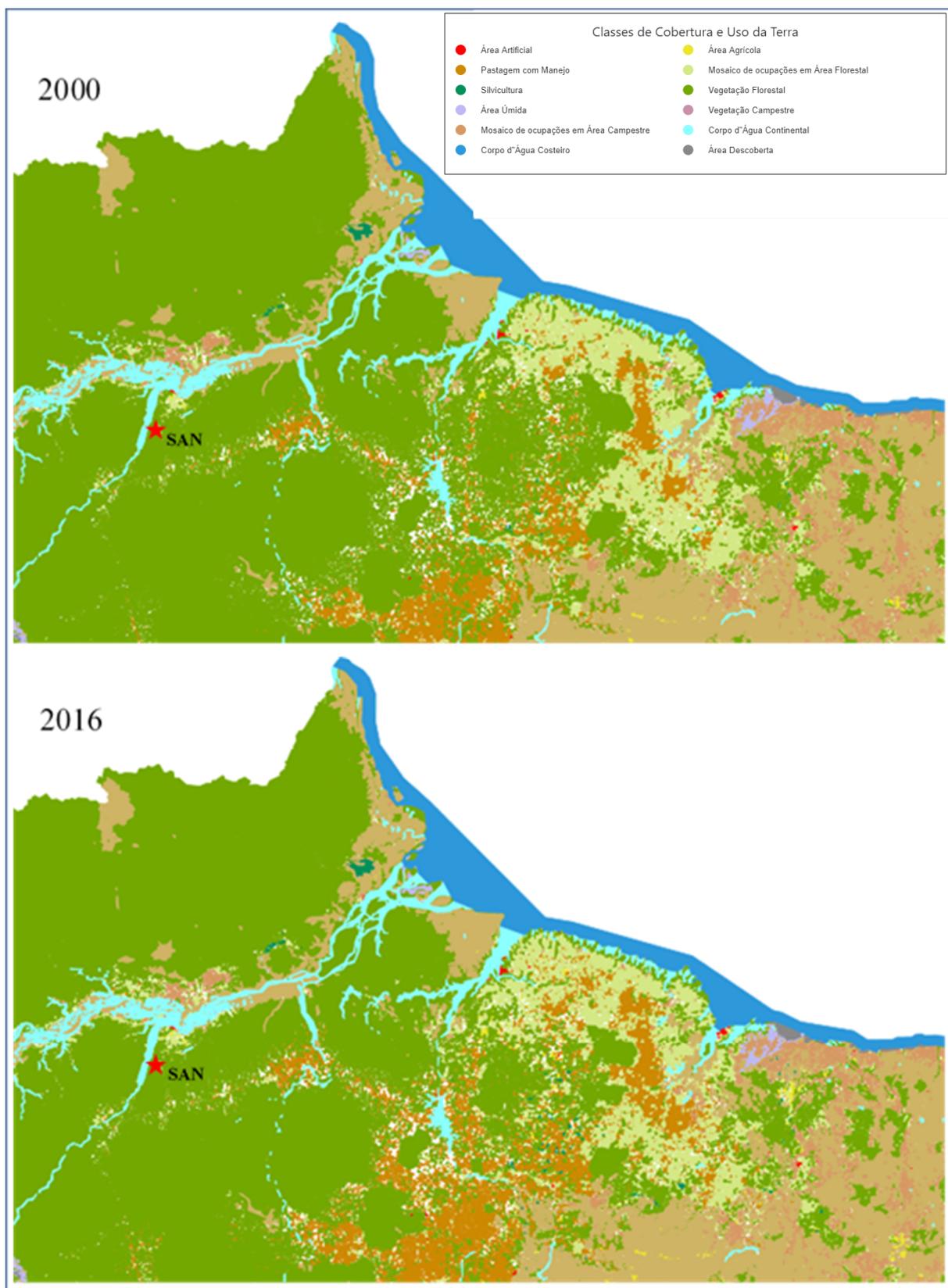
Fonte: Autores

Os perfis foram normalmente obtidos entre as 12:00 e 13:00 horas (LT), quando a camada limite planetária está completamente desenvolvida. Este período também representa o tempo em que a média da coluna é mais similar à média diária (Chou et al., 2002). A amostragem é realizada a cada 300 metros, de 4400 a 1200 metros e depois a cada 150 metros. Além dos dados de perfis com aeronave, a análise apresentada neste trabalho também usa dados da Ilha de Ascensão (ASC – 7,92°S e 14,42°O) e Barbados (RPB – 13,17°N e 59,43°O) que são parte da rede global de amostragem atmosférica do ESRL/NOAA (Earth System Research Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration).

3. Resultados e Discussão

A área para a qual nossas medidas em SAN são sensíveis é caracterizada pela floresta tropical úmida na região próxima e também pela Amazônia Oriental e áreas a nordeste. A Figura 3 mostra o mapa de cobertura do uso da terra, destacando as mudanças entre 2000 e 2016 (IBGE, 2018). No setor sudeste, existe uma considerável quantidade de áreas desmatadas no leste e sul do Pará. As trajetórias de massa de ar também sugerem alguma influência adicional do cerrado e caatinga nos estados do Nordeste (Maranhão, Piauí e Ceará).

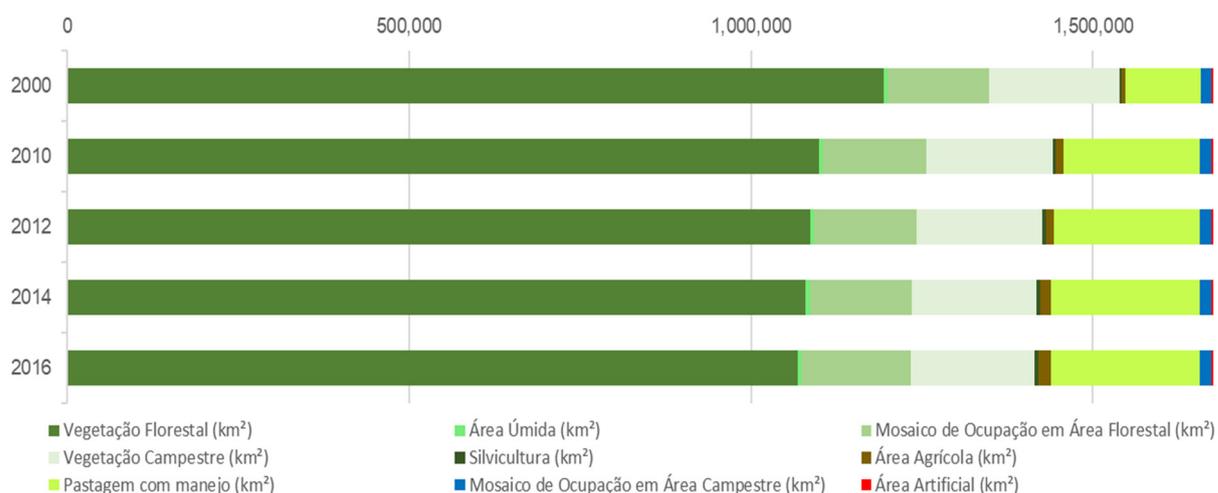
Figura 3 – Mapa de cobertura do uso da terra para a área de influência de SAN destacando as mudanças entre 2000 e 2016.



Fonte: adaptado de IBGE (2018).

Na Figura 4, as informações de cobertura e uso da terra de IBGE (2018) nos estados do Pará, Amapá e Maranhão nos anos 2000, 2010, 2012, 2014 e 2016 foram combinados. Observa-se a redução contínua das áreas florestais e aumentos as áreas de agricultura e pastagem. As maiores mudanças no período 2000 – 2016 foram a redução da Vegetação Florestal e o aumento da classe Pastagem com Manejo. Em destaque, observa-se que a Pastagem com Manejo vem diretamente da conversão de áreas de Vegetação Florestal.

Figura 4 – Cobertura e uso da terra nos os estados do Pará, Amapá e Maranhão entre 2000, 2010, 2012, 2014 e 2016.



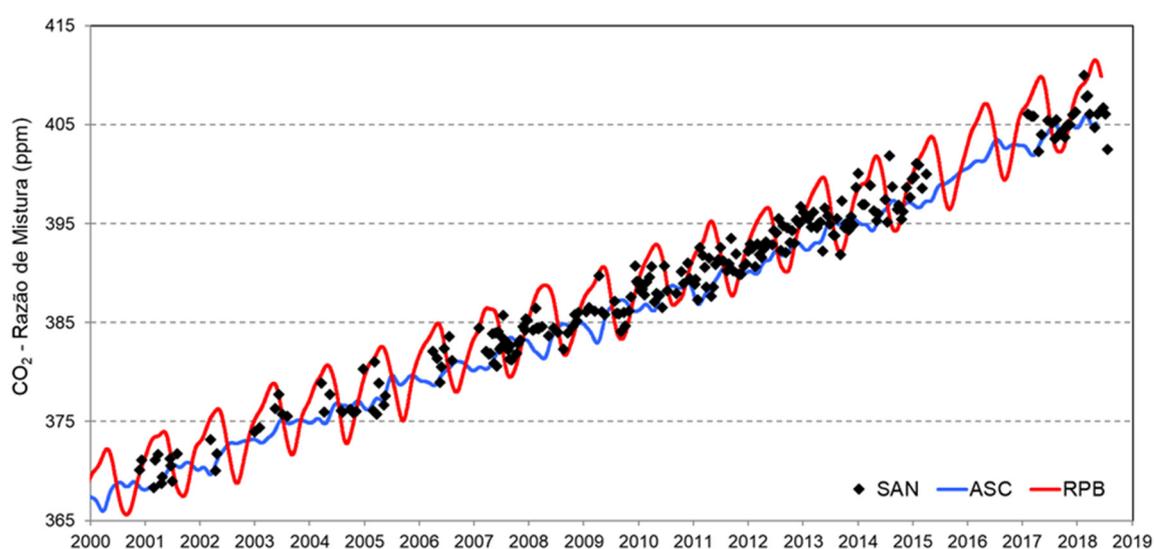
Fonte: adaptado de IBGE (2018), compilado pelos Autores.

Ao longo do seu caminho pela Bacia Amazônica, desde a costa até SAN, a parcela de ar acumula fluxo de CO₂ da superfície. Assim, a diferença entre nossas medidas em SAN e o background no Oceano Atlântico pode ser diretamente relacionada aos fluxos terrestres de CO₂ de todos os processos de emissão e absorção, conhecidos ou não, incluindo NEE de ecossistemas nativos e agropecuários, incluindo queima e qualquer uso de combustíveis fósseis.

A área de superfície coberta pelas trajetórias simuladas é a área representativa. As trajetórias inversas simuladas pelo modelo HYSPLIT confirmam que o ar que chega até SAN tem origem em ambos os hemisférios e a área englobada pelas trajetórias representa a área para o cálculo dos fluxos. Esta, quando todos os dias de amostragem são considerados, cobre entre 0,5 e 1 milhão de km². Frações molares maiores que as observações de background indicam fontes ao longo do caminho da massa de ar enquanto frações molares menores indicam absorção, já que a coluna de ar integra as contribuições para o fluxo ao longo do caminho. De dezembro de 2000 a julho de 2018 foram analisados 231 perfis verticais. Os valores médios da razão de mistura de CO₂ para cada perfil é mostrada na Figura 5, que também apresenta as curvas de background de ASC e RPB.

Na Figura 6 são apresentados os valores médios para os frascos coletados na troposfera livre (topo do perfil, acima de 3,8 km), que representam o ar que entra no continente, sem a influência continental, e para os pontos do perfil considerados dentro da Camada Limite Planetária (CPL, abaixo de 1,2 km acima do nível do mar), que representa as emissões e absorções que estão ocorrendo na superfície e se acumulam até a CPL. A diferença média entre o topo do perfil e abaixo da camada limite para o período de 2000 a 2018 foi de $0,51 \pm 2,77$ ppm, sugerindo que a área de influência de SAN tem uma contribuição positiva no fluxo de carbono, isto é, apresenta mais emissão do que absorção de carbono.

Figura 5 – Valores médios da razão de mistura do CO₂ atmosférico para cada perfil vertical de SAN e curvas de concentração de background em ASC e RPB.

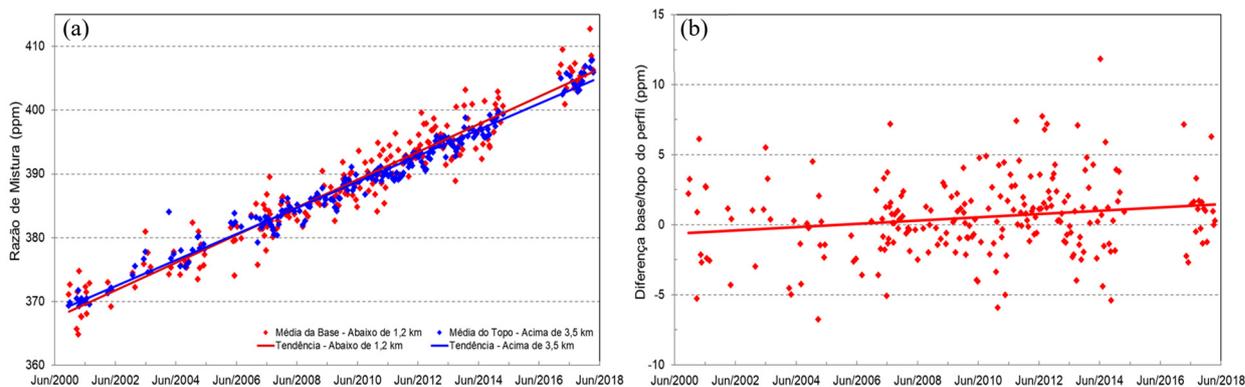


Fonte: Autores

A análise das linhas de tendência (linhas azul e vermelha na Figura 6) mostra uma mudança de contribuição ao longo do tempo, pois a linha vermelha, que é a média abaixo da CLP e representa as atividades entre a superfície até a CPL, apresentam uma inclinação maior que a linha azul, que representa a parte alta do perfil e está associada ao ar de entrada no continente (*background*). Em 2010 as duas linhas eram quase coincidentes e com o passar do tempo as linhas diferem com maior intensidade, com a linha vermelha ficando mais alta, isto é, a concentração média entre a superfície e a CPL foi enriquecendo em relação ao ar que entra no continente, indicando claramente uma maior emissão de CO₂ para a atmosfera. Esta mudança de comportamento é evidenciada quando se observa a diferença entre as medidas realizadas abaixo da CPL (1,2 km) e acima de 3,8 km, apresentada na figura 6 (abaixo). Considerando a linha de tendência, observamos um aumento de 0,12 ppm por ano, ao longo do período de 18 anos de observação. A análise dos 98 perfis medidos de 2000 a 2009, mostra que a diferença em SAN se apresentava quase neutra, com média de $-0,05 \pm 2,52$ ppm. De 2010 a 2018, foram

obtidos 135 perfis verticais, onde a diferença entre a troposfera livre (acima de 3,8 km) e abaixo da Camada Limite Planetária (abaixo de 1,2km) ficou em 0.93 ± 2.89 ppm, mostrando que SAN pode ter passado de uma condição próxima a neutralidade para de fonte de CO₂ ao longo do período estudado.

Figura 6 – Valores médios da razão de mistura de CO₂ para o topo (azul) e base do perfil (vermelho), com a linha de tendência (a). Diferença da razão de mistura do CO₂ entre topo e base do perfil vertical em SAN (b).



Fonte: Autores

Alterações locais nas variáveis climáticas, como a precipitação e temperatura, provavelmente estão sendo induzidas pelas mudanças do uso da terra, queimadas e degradação da floresta. Todas estas alterações podem contribuir para a conversão da Amazônia Oriental de uma condição de sumidouro para a de emissora de CO₂ para a atmosfera.

4. Conclusões

A Floresta Amazônica desempenha um papel importante para o clima tropical da América do Sul. Mudanças na cobertura vegetal podem ter impacto importante na temperatura e nas taxas de precipitação tanto da própria Amazônia quanto do restante da América do Sul. A mudança de comportamento do CO₂ nos perfis obtidos por avião é evidenciada quando se observa a diferença entre as medidas realizadas abaixo da Camada Limite Planetária (1,2 km) e acima de 3,8 km (que se pode ser considerado uma medida mais próxima do background regional). Considerando a linha de tendência, observamos um aumento de 0,12 ppm por ano na diferença entre o topo e a base dos perfis ao longo do período de 18 anos de observação.

As mudanças no uso da terra podem fazer com que a Amazônia Oriental deixe de atuar como um sumidouro do carbono atmosférico, e passe a ser um importante emissor de Gases de Efeito Estufa. Esta conversão está em concordância com o aumento observado nas concentrações dos perfis verticais e das áreas de agropecuária e de redução de área florestal.

Agradecimentos:

Agradecemos à FAPESP (processo FAPESP 2016/02018-2), ao CNPq (processo CNPq 480713/2013-8), ao ERC (*European Research Council* no programa Horizon 2020) e ao NERC (*Natural Environment Research Council*, através do projeto GeoCarbon) pelo apoio financeiro na execução do projeto.

5. Referências

- CHOU, W. W.; WOFSEY, S. C.; HARRISS, R. C.; LIN, J. C.; GERBIG, C.; SACHSE, G. W. Net fluxes of CO₂ in Amazonia derived from aircraft observations. **J. Geophys. Res.**, 107(D22), 4614, 2002.
- D'AMELIO, M. T. S.; GATTI, L. V.; MILLER, J. B.; TANS, P. Regional N₂O fluxes in Amazonia derived from aircraft vertical profiles. **Atmos. Chem. Phys.**, 9, 8785–8797, 2009.
- FELDPAUSCH, T. R.; LLOYD, J.; LEWIS, S. L.; BRIENEN, R. J. W.; GLOOR, M.; MONTEAGUDO MENDOZA, A.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; BANIN, L.; PHILLIPS, O. L.; et al. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. **Biogeosciences**, 9, 3381–3403, 2012.
- GATTI, L. V.; MILLER, J. B.; D'AMELIO, D.; MARTINEWSKI, A.; BASSO, L. S.; GLOOR, M.; WOFSEY, S.; TANS, P. Vertical profiles of CO₂ above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balanced biosphere between 2000 and 2009. **Tellus B**, 62, 581–594, 2010.
- GATTI, L. V.; GLOOR, M.; MILLER, J. B.; DOUGHTY, C. E.; MALHI, Y.; DOMINGUES, L. G.; BASSO, L. S.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C. S. C.; BORGES, V. F.; FREITAS, S.; BRAZ, R.; ANDERSON, L. O.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, O. L.; LLOYD, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, 506, p.76-80, 2014.
- GLOOR, M.; GATTI, L.; BRIENEN, R.; FELDPAUSCH, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MILLER, J.; OMETTO, J. P.; ROCHA, H.; BAKER, T.; HOUGHTON, R. A.; MALHI, Y.; ARAGAO, L. E. O. C.; ZHAO, K.; PEYLIN, P.; HUNTINGFORD, C.; LEVY, P.; LLOYD, J. The carbon balance of South America: a review of the status, decadal trends and main determinants. **Biogeosciences**, 9, 5407 - 5430, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2014-2016**. Rio de Janeiro, 2018. 31p.
- MALHI, Y.; PHILLIPS, O. L. **Tropical Forests and Global Atmospheric Change**. Oxford University Press, Oxford, 356pp, 2005.
- MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; SILVEIRA LOBO STERNBERG, L.; RIBEIRO, A.; ZACHARIAS MOREIRA, M. Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. **J. Hydrol.**, 183(3–4), 191-204, 1996.
- MILLER, J. B.; GATTI, L. V.; D'AMELIO, M. T. S.; CROTWELL, A.; DLUGOKENCKY, E. J.; BAKWIN, P.; ARTAXO, P.; TANS, P. Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon basin. **Geophys. Res. Lett.**, 34, L1080, 2007.
- OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophys. Res. Lett.**, 30, 2199, 2003.
- SALATI, E.; DALL'OLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J. R. Recycling of Water in the Amazon, Brazil: an isotopic study. **Water Resources Research**, 15(5), 1250-125, 1979.
- SILVA DIAS, M. A. F.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; SILVA DIAS, P. L.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A. J.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M.; MANZI, A. O.; FUENTES, J. D.; ROCHA, H. R.; MARENGO, J.; PLANAFATTORI, A.; SA, L. D. A.; ALVALA, R. C. S.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; GIELOW, R.; GATTI, L. V. Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon Region. **J. Geophys. Res.**, 107(D20), 8072, 2002.
- SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S.R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, 489, 282-285, 2012.