

O PAPEL DAS PARTÍCULAS DE AEROSSOL NO FUNCIONAMENTO DO ECOSISTEMA AMAZÔNICO

Theotônio Pauliquevis
Paulo Artaxo
Paulo Henrique Oliveira
Melina Paixão

INTRODUÇÃO A composição da atmosfera tem forte influência no clima de nosso planeta, tanto do ponto de vista da concentração de gases quanto na presença de partículas de aerossóis que são críticas para o equilíbrio dos ecossistemas e do clima. Com a recente divulgação do 4º Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007)(1) ficou muito claro o forte papel climático que gases traços como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso exercem. Também ficou explícita que as mudanças climáticas, que vêm sendo observadas em nosso planeta são realmente causadas pelas emissões antropogênicas, e que se nada for feito para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o clima poderá sofrer profundas mudanças nas próximas décadas.

No relatório do IPCC também ficou claro o forte papel de impacto que as partículas de aerossóis realizam sobre o clima. As partículas de aerossol – tanto naturais quanto as emitidas em processos antrópicos – existem em todos os lugares, e influenciam o clima de diversas maneiras: atuam na absorção e espalhamento de radiação solar, na formação de nuvens, na reciclagem de nutrientes em ecossistemas, na composição química da precipitação, na visibilidade e na saúde das pessoas, entre outros papéis importantes. Em particular, o papel dessas partículas como núcleos de condensação de nuvens é crítico na formação e desenvolvimento delas. Sem essas partículas, nuvens não existiriam e todos os ecossistemas seriam muito diferentes do que conhecemos.

Discutiremos, neste texto, de que maneira as partículas de aerossol presentes na região amazônica influenciam o clima local, e como o intenso processo de ocupação humana está alterando a composição da atmosfera na Amazônia, com fortes reflexos sobre o clima local, regional e global.

A COMPOSIÇÃO NATURAL DAS PARTÍCULAS DE AEROSSÓIS NA AMAZÔNIA Sob condições não perturbadas pela ação humana, a concentração de partículas na atmosfera amazônica é muito baixa, comparável àquelas encontradas nas mais remotas regiões do globo (2). Essas baixas concentrações constituem um fato notável, uma vez que regiões continentais, de maneira geral, são caracterizadas por concentrações mais elevadas de partículas. Durante a estação chuvosa (que varia de região para região, mas que, de maneira geral, vai de dezembro a maio), foram observadas cerca de 200–400 partículas/cm³, dez vezes menos que o observado em outras áreas continentais do globo, e 100 a 1000 vezes menores que os valores observados em áreas afetadas por queimadas na Amazônia, que apresentam altas concentrações de 20.000 a 40.000 partículas/cm³.

A geração e emissão pela floresta dessas partículas ainda é um mistério. Essas partículas podem ser divididas em duas frações, de acordo com o tama-

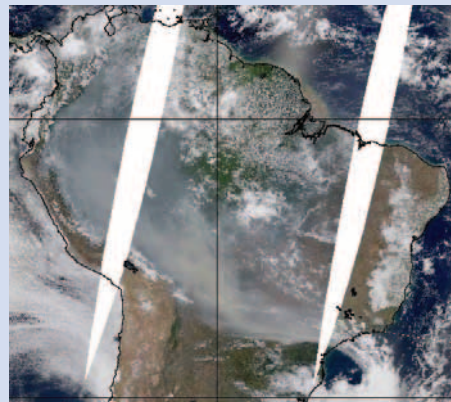


Figura 1: pluma de partículas de aerossóis provenientes de emissões de queimada na Amazônia cobre grande área da América do Sul

no. A fração fina compreende partículas menores que 2 micra (μm) de tamanho e são produzidas principalmente através da conversão em partículas de gases biogênicos emitidos pela vegetação tais como isopreno e terpenos, além de outros compostos orgânicos voláteis. A fração grossa, que compreende as partículas maiores que 2 microns, são constituídas por fragmentos de folhas, grãos de pólen, bactérias, fungos e uma enorme variedade de outros tipos de partículas biogênicas. Essas partículas emitidas diretamente pela vegetação são chamadas primárias; desconhece-se a razão da emissão da maior parte delas pela vegetação. O padrão temporal de emissão de partículas biogênicas também é bastante peculiar. A concentração de aerossóis da moda grossa no período noturno é aproximadamente o dobro da observada durante o dia. Análise da morfologia dessas partículas por microscopia eletrônica indica que esse crescimento noturno está relacionado a um aumento do número de esporos de fungos em suspensão no ar (3). Há duas razões para esse aumento. Primeiramente, o período noturno na floresta é caracterizado por uma atmosfera estável, com baixa velocidade do vento, o que diminui a dispersão dos esporos, facilitando sua acumulação junto das espécies emissoras. Em segundo lugar, muitas espécies de fungos são conhecidas por serem esporuladores noturnos. Tal comportamento é compreensível, uma vez que, durante a noite, a umidade relativa do ar (UR) comumente atinge 100% abaixo da copa das árvores, formando facilmente gotículas que podem servir como meio de cultura. A ausência noturna de ventos verticais ou movimentos convectivos, que pudessem levar os esporos para regiões acima da copa das árvores, também é um ponto importante para sua acumulação junto às espécies emissoras e explica parcialmente o porquê dessa emissão se dar preferencialmente a noite. Caso a emissão ocorresse durante o dia, os esporos seriam levados mais facilmente para a porção acima da copa das árvores, onde ficariam expostos à radiação ultravioleta, danosa a seus tecidos, e teriam menor chance de sucesso. Para as partículas menores, pertencentes à moda fina, também há o mesmo tipo de processo de emissão, mas outros mecanismos importantes também atuam na geração de partículas mais finas. A bacia amazônica é responsável por uma grande fração das emissões de compostos orgânicos voláteis (COV's), que são compostos químicos orgânicos que têm pressão de vapor suficientemente alta para, em condições normais, vaporizarem e se dispersarem na atmosfera. No caso da vegetação da floresta, as maiores emissões são de isopreno e terpenos. Uma vez lançados na atmosfera, alguns dos COV's convertem-se em partículas de aerossol através de reações, sendo assim denominados aerossóis secundários orgânicos (ASO), uma vez que não foram emitidos direta-

mente na atmosfera mas sim originados a partir de precursores gasosos. As reações que formam ASO são fortemente relacionadas com a presença de luz solar. Como a região tropical está sujeita a uma grande incidência de radiação solar, na Amazônia esse tipo de processo de formação de partículas é muito importante.

Do ponto de vista climático e de química da atmosfera, os aerossóis biogênicos orgânicos (primários e secundários) são de considerável importância. Um papel essencial exercido por essas partículas é na formação de nuvens. Para ocorrer a formação de gotas de nuvens é necessário não apenas que o ar esteja saturado de vapor de água, mas que também exista alguma superfície para que o vapor condense. Na natureza, quem desempenha o papel dessa superfície de condensação é uma fração dos aerossóis denominada de Núcleos de Condensação de Nuvens (NCN), partículas sobre as quais o vapor se deposita formando gotículas de nuvens.

Justamente pelo fato de tanto os aerossóis primários como secundários serem efetivos como NCN, e também o fato dos aerossóis orgânicos primários serem efetivos também como “Núcleos de gelo” (que atuam na formação de cristais de gelo em nuvens que atingem altitudes elevadas) as propriedades óticas e microfísicas das nuvens da região amazônica são influenciadas por essas partículas. Como uma fração considerável da distribuição de calor no planeta vindo dos trópicos para latitudes maiores é mediada pela convecção profunda na região tropical, alterações nas características de tais partículas, como por exemplo, através de desflorestamento e queimadas, podem causar alterações significativas no clima global.

Além das emissões naturais da floresta, uma pequena fração dos aerossóis na bacia amazônica é originada do transporte de poeira do Saara, que ocorre tipicamente durante os meses de abril e maio (4). Apesar de representar uma pequena fração da massa de aerossóis, há muitos estudos investigando o papel em longo prazo desse transporte de micro nutrientes na “fertilização” da floresta, isto é, na reposição de micro-nutrientes importantes para o ecossistema amazônico. Este é um aspecto importante. É fato conhecido que a floresta amazônica está sobre terrenos nutricionalmente pobres, e que os mecanismos de reciclagem da floresta são fundamentais para o funcionamento do ecossistema. Neste contexto, e considerando em termos de longo prazo, a entrada de micro nutrientes por uma fonte externa pode ser crítica para o ecossistema em termos de longo prazo. Dentro do conjunto de micro-nutrientes críticos, a quantidade de fósforo disponível é um fator limitante importante para o ecossistema e a reposição por transporte de poeira do Saara é uma das possíveis explicações para os atuais níveis de produção primária da floresta amazônica (5).

A FLORESTA PERTURBADA PELAS QUEIMADAS Desde meados da década de 1970, a região amazônica tem sofrido uma mudança no padrão de uso do solo associado a um processo de ocupação desordenado. A chamada região do “arco do desflorestamento” (estado de Rondônia, norte do Mato Grosso, sul e leste do Pará, e Tocantins) é onde essa alteração é mais visível, movida pela expansão de áreas agrícolas, de pastagem, e também pela exploração madeireira. A mudança de uso da terra se dá, normalmente, pela queima de toda a biomassa existente na forma de floresta primária, permitindo sua utilização para outros usos.

A prática de queimadas é histórica, e acentuou-se a partir da década de 1970, com um desmatamento recente de cerca de 20 mil km² por ano. O inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa coloca que em termos de

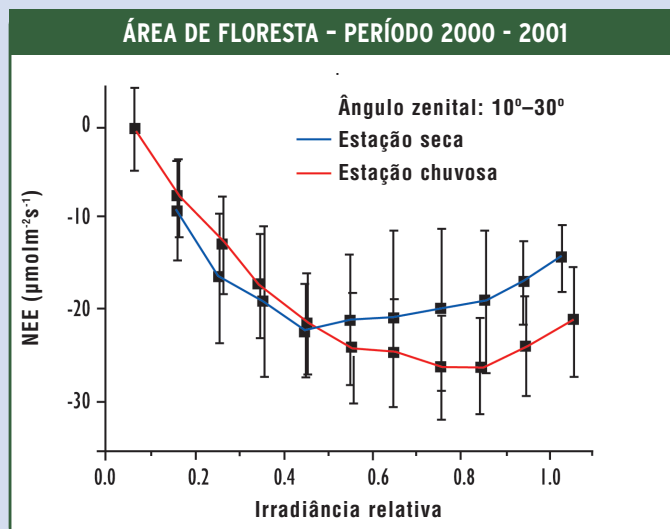


Figura 2: Net Ecosystem Exchange (vide texto para explanação) em função da irradiância relativa.

emissão de CO₂, queimadas são responsáveis por 75% das emissões brasileiras de carbono (6), o que coloca a mudança de uso da terra como a principal causa de emissão de gases de efeito estufa no Brasil.

A emissão de partículas de aerossóis devido à prática de queimadas na Amazônia é muito alta, com significativas emissões levando a altas concentrações de material particulado na atmosfera. As concentrações de material particulado em regiões do arco do desmatamento atingem valores de 400 a 600 μg/m³, valores muitas vezes superiores aos observados no inverno em São Paulo (2 e 7). As queimadas são também fontes significativas de gases de efeito estufa como CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano). Grandes quantidades de gases precursores de ozônio são emitidas, fazendo com que a concentração de ozônio atinja níveis danosos à floresta não queimada, uma vez que se trata de um gás fitotóxico (8).

A pluma de gases e partículas de aerossóis emitidos por queimadas atinge amplas áreas no continente sul-americano. Como as partículas emitidas em queimadas são predominantemente na fração fina, estão sujeitas ao transporte de larga escala por milhares de quilômetros. A figura 1, feita pelo sensor Modis a bordo do satélite Terra/Nasa, mostra um padrão típico de transporte de plumas de aerossóis de queimadas originadas na Amazônia. A distribuição espacial da pluma que se vê na figura 1 é muito comum nessa época do ano: durante os meses de agosto/setembro/outubro se estabelece no Brasil Central uma circulação de ventos no sentido anti-horário. Dessa forma, as plumas seguem para oeste até a cordilheira do Andes quando, então, são defletidas para a direção sul e em seguida para o leste, quando se dispersam no Oceano Atlântico.

Como os aerossóis de queimadas interagem diretamente com a radiação solar, as queimadas alteram severamente a quantidade de radiação solar que chega à superfície. Procópio e outros (9) mostram que, sob certas circunstâncias, os aerossóis originados de queimada chegam a reduzir em 50% a radiação fotossinteticamente ativa (a mais adequada para as plantas realizarem fotossíntese). Um resultado interessante é que, apesar da quantidade total de radiação que atinge a superfície ser menor, ela é quase que totalmente na

forma de radiação solar difusa (como em um dia nublado), em detrimento da radiação solar direta. Devido a essa mudança no padrão, a taxa de fotossíntese chega a ser maior com a presença de aerossóis, pois a radiação difusa penetra mais no interior do dossel da floresta, atingindo um número maior de folhas e aumentando a taxa fotossintética, até um certo nível. Com muita fumaça, o processo fotossintético para por completo, por ausência de radiação solar na quantidade requerida ao processo. A figura 2 ilustra esse resultado. Esse gráfico mostra o *NEE* (Net Ecosystem Exchange, que é uma medida direta do processo de fotossíntese e da respiração da floresta. Quanto mais negativo é esse valor, mais CO₂ a floresta está sendo capaz de fixar). Os resultados são apresentados em função da irradiância relativa, que é uma medida da relação entre a radiação solar difusa e a radiação solar direta. Quando esse valor é igual a um, significa a completa ausência de nuvens, e que a presença de aerossóis na atmosfera encontra-se no seu valor mínimo (*background*). Por outro lado, quando esse valor se aproxima de zero, significa que há um aumento da quantidade de nuvens e aerossóis na atmosfera. A partir da figura 2 pode-se observar que a máxima fixação de CO₂ (*NEE* mais negativo) não ocorre em dias de céu limpo (irradiância relativa igual a 1.0), mas sim sob condições nas quais há mais nuvens e partículas na atmosfera (irradiância relativa em torno de 0.6). Isso ocorre tanto na estação seca, onde há uma grande quantidade de aerossóis na atmosfera e poucas nuvens, quanto na estação chuvosa, onde há poucas partículas de aerossóis e muitas nuvens na atmosfera (figura 2). Entretanto, esse comportamento vale apenas até um valor crítico da irradiância relativa (em torno de 0.6), quando a partir de então esse mecanismo não é capaz de compensar a redução da radiação solar e o processo de fotossíntese é prejudicado.

As queimadas também influenciam severamente os mecanismos de formação de nuvens. Primeiramente, ao injetarem grandes quantidades de NCN na atmosfera, ocorre um aumento muito grande no número de gotas formadas dentro da nuvem. Como a quantidade de vapor de água é a mesma, essas gotas terão tamanho menores do que aquelas da condição não perturbada por fumaça. O resultado desse tipo de fenômeno é a forte redução na eficiência da nuvem em gerar precipitação uma vez que para ocorrer chuva é necessário que as gotas atinjam um tamanho mínimo, o que não ocorre a baixas altitudes para nuvens enfumaçadas (10 e 11).

A outra maneira pela qual as queimadas alteram a formação de nuvens é pela atenuação de radiação que chega a superfície. Boa parte da precipitação na Amazônia é oriunda de nuvens convectivas, isto é, nuvens formadas localmente, a partir do aquecimento da superfície, o que gera a ascensão de massas de ar que podem formar nuvens. Se a quantidade de radiação chegando a superfície é menor, a convecção também o será uma vez que a energia para iniciá-la é muitas vezes insuficiente para formar nuvens. Como as plumas de queimada se espalham por grandes áreas, esse tipo de efeito de supressão de formação de nuvens ocorre em boa parte da Amazônia durante a estação de queimadas, fenômeno confirmado por observações a partir de satélites (12).

CONSIDERAÇÕES FINAIS A região amazônica vem passando por profundas mudanças devido ao intenso processo de ocupação humana que ocorre desde o final dos anos 1970. Todas essas alterações causam mudanças importantes na composição química da atmosfera não apenas na Amazônia, mas também em regiões contíguas, além do potencial efeito no clima global. O investimento em pesquisas científicas para o maior conhecimento

dos mecanismos que regulam os processos críticos para a manutenção da floresta, incluindo suas inter-relações complexas entre biosfera e atmosfera são muito importantes. Os resultados desses estudos auxiliarão na proposição futura de políticas públicas que possam permitir um desenvolvimento sustentável da região, com preservação do ecossistema amazônico e que permita a melhoria das condições de vida da população local.

Theotonio Pauliquevis é pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa) Paulo Artaxo, Paulo Henrique Oliveira e Melina Paixão são pesquisadores do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IPCC: Climate Change 2007: The 4th assessment report to the intergovernmental panel on climate change, available at <http://www.ipcc.ch>.
2. Artaxo P., J. V. Martins, M. A. Yamasoe, A. S. Procópio, T. M. Pauliquevis, M. O. Andreae, P. Guyon, L. V. Gatti, and A. M. C. Leal, "Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondônia, Amazonia", *J. Geophys. Res.*, 107 (D20), 8081, doi:10.1029/2001JD000666, 2002.
3. Graham B., et al., "Composition and diurnal variability of the natural Amazonian aerosol", *J. Geophys. Res.*, 108 (D24), 4765, doi: 10.1029/2003JD004049, 2003.
4. Koren, I.; Kaufman, Y.J.; Washington, R.; Todd, M. C.; Rudich, Y.; Martins, J.V. e Rosenfeld, D. "The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest", *Environ. Res. Lett.* 1 014005 (5pp) doi:10.1088/1748-9326/1/1/014005, 2006
5. Okin G. S., Mahowald, N., Chadwick, O. A., Artaxo, P. "Impact of desert dust on the biogeochemistry of phosphorus in terrestrial ecosystems", *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB2005, doi:10.1029/2003GB002145, 2004.
6. MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia) - Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa, 2002.
7. Fuzzi S., et al. (2007), "Overview of the inorganic and organic composition of size-segregated aerosol in Rondônia, Brazil, from the biomass-burning period to the onset of the wet season", *J. Geophys. Res.*, 112, D01201, doi:10.1029/2005JD006741.
8. Andreae M. O., et al., "Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA-Eustach experiments", *J. Geophys. Res.*, 107 (D20), 8066, doi:10.1029/2001JD000524, 2002.
9. Procópio, A. S.; Artaxo, P.; Kaufman, Y. J.; Remer, L. a.; Schafer, J. S.; Holben, B. N. "Multiyear analysis of Amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate". *Geophysical Research Letters*, 31, L03108-L03112, doi:10.1029/2003GL018646, 2004.
10. Rosenfeld, D. "TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall". *Geophys. Res. Lett.* 26 (20): 3105-3108 oct. 15, 1999.
11. Andreae MO, Rosenfeld D, Artaxo P, Costa, A.A., Frank, G.P., Longo, K.M., Silva-Dias, M.A.F. "Smoking rain clouds over the Amazon", *Science*, 303 (5662): 1337-1342, Feb. 27, 2004.
12. Koren, I., Kaufman, Y.J., Remer, L.A., Martins, J.V. "Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation", *Science* 303 (5662): 1342-1345, Feb. 27, 2004