



Vegetação e  
Clima  
Aerossóis  
Aerossóis  
Vegetação e  
Clima  
Aerossóis  
Aerossóis

Partículas de aerossóis liberados pela vegetação agregam gotas

# O MECANISMO DA FLORE

d'água, formam nuvens baixas e garantem as chuvas na Amazônia

# ESTA PARA FAZER CHOVER

Por PAULO ARTAXO, MARIA ASSUNÇÃO FAUS DA SILVA DIAS e MEINRAT O. ANDREAE

## Quando olhamos para o céu sempre observamos nuvens. Sem nuvens, não haveria

chuva pelos mecanismos que conhecemos e, portanto, o planeta seria muito diferente. Os ingredientes que fazem uma gotícula de nuvem são basicamente dois: vapor de água e um núcleo de condensação de nuvens (NCN). Esse núcleo consiste numa minúscula partícula de aerossol (em geral com tamanho de 1 a 15 micrômetros) em torno do que o vapor de água se condensa, formando a gotícula microscópica. Essa gotícula cresce por uma série de processos físicos até chegar a um tamanho crítico, a partir do que, precipita como chuva.

Na Floresta Amazônica, a principal fonte natural dessas partículas de NCN é a própria vegetação que, com processos de emissão de partículas, fornece os NCNs para formação da chuva e de todo o intenso ciclo hidrológico que a sustenta. Os aerossóis e as nuvens são uma parte crítica do complexo sistema climático e biogeoquímico da Amazônia. Durante sua evolução, a floresta desenvolveu mecanismos muito eficientes para reciclar e manter seus preciosos (e raros) nutrientes e para fornecer a água que mantém o vigoroso ciclo hidrológico amazônico. A taxa de precipitação na Amazônia é uma das mais altas do mundo, com locais onde chove mais de três mil mm de água por ano, com um ciclo de evaporação e precipitação natural altamente eficiente.

Com a chegada em larga escala do homem na Amazônia, ao longo dos últimos 30 anos, uma parte destes ciclos naturais está sendo alterada em algumas regiões, com resultados preocupantes do ponto de vista das alterações possíveis nos ciclos

biogeoquímicos que sustentam o funcionamento do ecossistema. As emissões de poluentes atmosféricos pelas queimadas na época da seca (agosto a novembro) modificam profundamente as características físicas e químicas da atmosfera amazônica. Altíssimas concentrações de partículas de aerossóis alteram o balanço de luz solar que atinge a superfície, absorvendo uma parte significativa da radiação que seria aproveitada pelo ecossistema. Este aquecimento atmosférico também modifica o perfil natural da variação da temperatura com a altura, no sentido de tornar mais difícil a formação de nuvens.

A fumaça também leva nutrientes que são essenciais para a floresta, como o fósforo, que é perdido para o ecossistema, pois a fumaça é transportada a longa distância, e deposita-se ao longo de seu trajeto rumo ao oceano Atlântico sul e ao Pacífico tropical. Com as queimadas, também são emitidas grandes quantidades de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e CH<sub>4</sub> (metano), os principais gases de efeito estufa, fazendo com que a atmosfera global aumente sua carga de gases que absorvem o calor terrestre, causando um aumento médio global da temperatura do planeta. As emissões das queimadas também formam um poluente crítico, que é o gás ozônio (O<sub>3</sub>). O ozônio formado como um poluente secundário, a partir das emissões de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, é um gás fitotóxico, ou seja, danifica os estômatos das plantas. Como ele é formado depois de seus precursores viajarem algum tempo na atmosfera, os danos atingem a vegetação não queimada, a milhares de quilômetros de distância.

É evidente que a maior parcela de responsabilidade pelas emissões de gases de efeito estufa é dos países industrializados. Desde o início da Revolução Industrial, a atmosfera terrestre foi vista como um enorme reservatório de rejeitos para absorver essa carga enorme de poluentes globais. Observamos nos últimos 20 anos que, na verdade, o ecossistema terrestre está sofrendo pressões ambientais que estão alterando seus modos básicos de funcionamento, em particular o balanço de radiação atmosférico, além de outros mecanismos. As consequências disso serão significativas, embora a ciência ainda não possa prever com exatidão quando, onde e quais serão as consequências. O consenso científico global é que não devemos esperar para que o pior aconteça. Pode ser tarde demais.

As alterações globais no ciclo hidrológico têm consequências importantes, com modificações na taxa de precipitação em grandes áreas do globo, provavelmente afetando a produção agrícola

### Resumo/Como a Floresta Produz a Chuva

- Na Floresta Amazônica, a principal fonte de núcleos de condensação de nuvens (NCN) é a própria vegetação. Os NCNs são partículas microscópicas de aerossol com propriedades de condensar a água em sua superfície.
- As chuvas de nuvens rasas, na estação chuvosa, devolvem os NCNs à superfície praticamente no mesmo lugar em que foram gerados pela floresta. As nuvens profundas são carregadas por ventos mais intensos de altitude e viajam centenas de quilômetros de seu local de origem, exportando as partículas no interior das gotas de chuva.
- Alterações na formação de nuvens na Amazônia podem estar ocorrendo como resultado das queimadas, devido à ocupação humana da região ao longo dos últimos 30 anos. Nuvens formadas por processos naturais e como resultado de queimadas têm aspectos bem distintos.
- A vegetação da Floresta Amazônica naturalmente emite e absorve gases e partículas para a atmosfera, em uma interação crítica para o metabolismo da floresta.

## FORMAÇÃO DE NUVENS ENVOLVENDO AEROSSÓIS

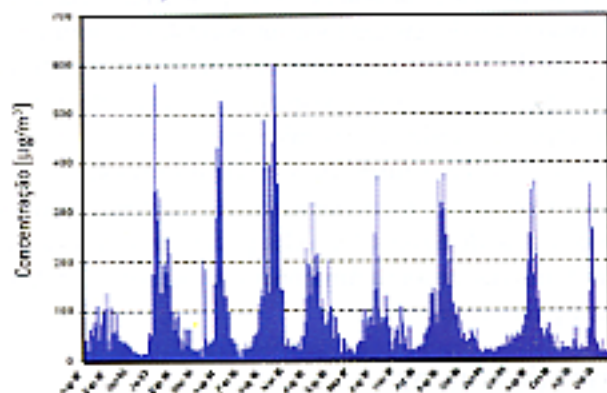
Como a formação de nuvens

os importantes para a formação de nuvens. Os processos físicos e químicos de emissão, conversão e crescimento das partículas e as condições ambientais são fatores importantes para a formação de nuvens.

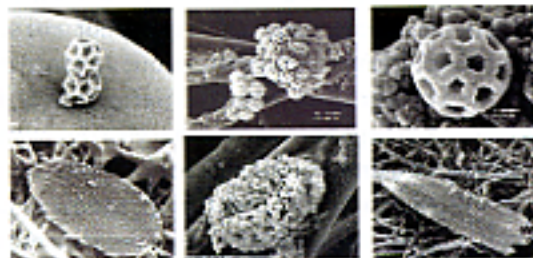
O segundo tipo básico de partículas de aerossóis consiste em partículas orgânicas primárias, que são produzidas diretamente por processos biológicos e físicos. Essas partículas são produzidas naturalmente pela vegetação da Floresta Amazônica.

Essas partículas são produzidas naturalmente pela vegetação da Floresta Amazônica. Elas são produzidas diretamente por processos biológicos e físicos. Essas partículas são produzidas naturalmente pela vegetação da Floresta Amazônica.

### CONCENTRAÇÃO DE AEROSSÓIS EM ALTA FLORESTA (1992-2001)



**CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS** de aerossóis atmosféricos em Alta Floresta, região norte do estado de Mato Grosso, mostrando o alto impacto de emissões de queimadas na região



**MICROGRAFIAS ELETRÔNICAS** de algumas partículas de aerossóis biogênicos emitidos naturalmente pela vegetação da Floresta Amazônica

la. A Amazônia é uma área importante, pois é a maior floresta tropical remanescente do planeta e a maior fonte continental de vapor de água da atmosfera, além de guardar a maior biodiversidade global.

Para responder a algumas dessas questões globais, o Brasil iniciou há alguns anos o Experimento de Larga Escala da Biosfera e Atmosfera da Amazônia (LBA, na sigla em inglês) para entender os processos críticos de funcionamento do ecossistema amazônico, seus condicionantes climáticos e o impacto que as alterações podem ter para o clima local, regional e global. As mudanças climáticas globais (como o aumento da concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$  e a elevação global da temperatura) também afetam o funcionamento do ecossistema amazônico, com impactos ainda desconhecidos.

A vegetação da Floresta Amazônica naturalmente emite e absorve gases e partículas para a atmosfera, em uma interação crítica para o metabolismo da floresta. Dois tipos básicos de partículas atmosféricas têm origem na floresta. As partículas finas (com diâmetros menores que dois micrômetros) são produzidas através da conversão em partículas de compostos orgânicos voláteis gasosos que a floresta emite, conhecidos como terpenos. Esses compostos, liberados em fase gasosa, rapidamente são oxidados e convertidos em partículas muito pequenas, que crescem até atingirem tamanhos que as habilitam a participar de proces-

so importantes para a formação de nuvens. Os processos físicos e químicos de emissão, conversão e crescimento dessas partículas ainda não são bem conhecidos.

O segundo tipo básico de partícula de aerossol consiste em partículas grossas (com tamanho maiores que dois micrômetros, podendo atingir entre 10 a 30 micrômetros), compostas pelas partículas biogênicas primárias, que são grãos de pólen, algas, bactérias, líquidos emitidos para a atmosfera pelos estômatos das plantas e várias outras categorias de partículas.

As concentrações naturais de partículas sobre a floresta são naturalmente muito baixas, atingindo em massa concentrações de 10 microgramas por metro cúbico de ar ou cerca de 300 partículas por centímetro cúbico. Em termos de composição química, essas partículas consistem em material carbonáceo orgânico, com traços de potássio, fósforo, enxofre, cálcio, zinco e outros elementos.

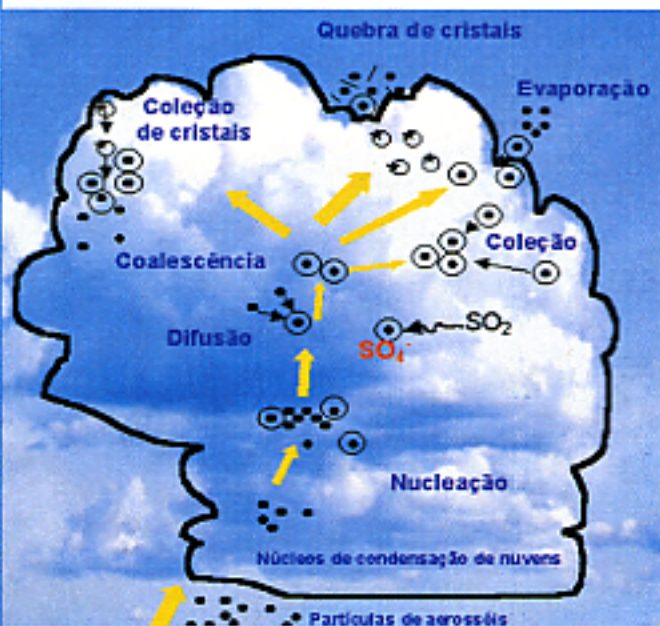
Quando as emissões de queimadas tomam conta da atmosfera amazônica, durante a estação seca, um quadro completamente diferente manifesta-se. Concentrações altíssimas são observadas, de até cerca de 400-600 microgramas por centímetro cúbico, ou cerca de 15 mil partículas por metro cúbico, principalmente na fração mais fina das partículas.

A concentração de partículas de aerossóis na região de Alta Floresta no norte do Mato Grosso, entre 1992 a 2002 pode ser observada no gráfico da pág. 44. A cidade de São Paulo, em seus piores períodos de inverno tem uma carga de aerossóis em partículas menores que 10 micrômetros e da ordem de 100 a 150 microgramas por metro cúbico. É curioso: em grandes regiões da Amazônia, observamos concentrações muito mais altas que no centro da cidade de São Paulo, região muito poluída, durante os piores momentos do inverno.

Essa enorme carga de partículas de aerossóis na atmosfera tem efeitos importantes sobre o funcionamento do ecossistema. O primeiro deles é que essas partículas de aerossóis absorvem até 400 watts por metro quadrado de radiação, alterando o fluxo de energia solar que atinge o ecossistema ao subtrair cerca de 30% do fluxo que chega do Sol na faixa de comprimento de onda da luz visível. Medidas realizadas por satélites mostram que essas altas concentrações de aerossóis não se limitam ao

## FORMAÇÃO DE NUVENS ENVOLVENDO AEROSSÓIS

MICROPARTÍCULAS participam da condensação da água



Mato Grosso, mas se estendem sobre uma extensa área da Floresta Amazônica, do Pará a Rondônia, cobrindo cerca de dois a quatro milhões de km<sup>2</sup> entre agosto e outubro, todos os anos.

As partículas biogênicas naturais são produzidas pela vegetação como parte de seu metabolismo natural. Elas formam a maior parte dos núcleos de condensação de nuvens na estação chuvosa, quando as emissões de queimadas são muito pequenas. As imagens da pág. 43, em micrografias eletrônicas mostram essas partículas naturais, ricas em elementos solúveis, orgânicos e inorgânicos. Essas partículas são excelentes núcleos de condensação de nuvens. Sem elas poderíamos ter uma cobertura de nuvens menor na Amazônia, com menor quantidade de chuva para o ecossistema.

### Fábrica de chuvas

Os NCNs são partículas microscópicas de aerossol com propriedades de condensar água em sua superfície. Entre 60 a 80% das partículas naturais de aerossóis na Amazônia atuam como NCNs. Uma vez formada, a gota cresce por uma série de mecanismos físicos. Entre o momento em que a gotinha inicia o processo de crescimento, com diâmetro típico de 20 micrômetros, até a chegada ao chão, como gota de chuva, com um diâmetro típico entre um a dois milímetros, muita coisa pode acontecer. O aumento, em volume, é proporcional ao raio da gota elevado ao cubo, o que corresponde a um aumento de até um milhão de vezes a partir do volume inicial. E o tempo de vida dessa gota é de aproximadamente uma hora.

#### OS AUTORES

**PAULO ARTAXO** é professor titular do Instituto de Física da USP, coordenador do Laboratório de Física Atmosférica e do Instituto do Milênio do Experimento LBA. Artaxo participa de um número elevado de comissões científicas internacionais que estudam questões relacionadas a mudanças climáticas globais. Coordena projetos de pesquisas em mudanças globais em parceria com a NASA, NOAA, NCAR, Instituto Max Planck, entre outros. **MARIA ASSUNÇÃO FAUS DA SILVA DIAS** é professora titular e vice-diretora do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Coordena Projeto Temático Fapesp que estuda aspectos meteorológicos na Amazônia e seu relacionamento com mudanças de uso de solo. **MEINRAU D. ANDREAE** é diretor do Instituto Max Planck de Química, em Mainz, na Alemanha. Trabalha com biogeoquímica, novo campo científico que estuda as interações entre a biosfera e ambiente químico terrestre.

As correntes de ar ascendente dentro de uma nuvem se originam de ar aquecido pelo contato com a superfície quente durante o dia. Pilotos de planador conhecem essas correntes de ar ascendente chamadas térmicas, pois fazem uso delas para ganhar altura. Essas correntes de ar sustentam as gotas de chuva dentro da nuvem, enquanto elas são pequenas. Mas à medida que essas gotas crescem, fica difícil sustentá-las e, eventualmente, elas caem como chuva. As gotas crescem por condensação do vapor d'água e, de forma mais eficiente, pelo choque com outras gotinhas menores que vão se agregando à gota maior. Toda vez que ocorre condensação de vapor, há liberação de calor latente de condensação que aquece o ar fazendo com que ele continue a adquirir velocidade para cima, como uma bolha de água quente num recipiente com água fria.

O peso das gotas já formadas e em crescimento vai desacelerando o ar. Durante a fase anterior à chuva, as gotas sentem a ação da gravidade puxando-as para baixo, mas a bolha quente flutuando, continua levando-as para cima na corrente ascendente e a nuvem vai se ampliando. Nesse momento, a quantidade de aerossóis, e em particular dos NCNs, tem um papel crítico. Se o ambiente é relativamente limpo, não poluído, há poucos NCNs. Na disputa pelo vapor d'água existente, se houver alguns NCNs relativamente grandes ou solúveis em água, estes vão crescer rapidamente, colidir com os menores e cair como chuva.

A nuvem não tem muito tempo para crescer, chegando no máximo a alturas entre quatro e cinco mil metros. Caso a atmosfera esteja poluída, com um número muito grande de NCNs, a disputa pelo vapor d'água disponível aumenta, as gotas crescem pouco e devagar enquanto a nuvem vai se estendendo. Muitas vezes, essas nuvens nem chegam a produzir chuva. As gotas evaporam e a água, junto com os aerossóis, não retorna ao chão e é levada pelos ventos a outros locais. Se a gota passar dos seis ou sete mil metros de altura, congela, pois, nessa região, o ar atinge temperaturas muito baixas.

As pedrinhas de gelo crescem de forma bastante eficiente enquanto a nuvem aumenta seu tamanho até 10 ou 15 mil metros de altura, um cúmulo-nimbo. Na queda até a superfície, as pedrinhas de gelo, em geral, derretem e chegam como gotas de chuva. Tipicamente, chamamos as nuvens rasas, em regiões limpas, de nuvens marítimas. As nuvens que contêm gelo, formadas em regiões poluídas, são conhecidas como nuvens continentais.

Mesmo em regiões limpas podemos ter os cúmulo-nimbo, pois basta que as térmicas sejam muito fortes para que as gotas não tenham tempo suficiente para crescer antes de atingir a altura de congelamento. Toda vez que uma nuvem tem grande quantidade de gelo, manifestam-se relâmpagos e trovões, que podem ser usados justamente para identificar a proximidade de um cúmulo-nimbo.

Na Amazônia as chuvas são produzidas pelos dois tipos de nuvens: as rasas e as profundas. Eles convivem na época mais

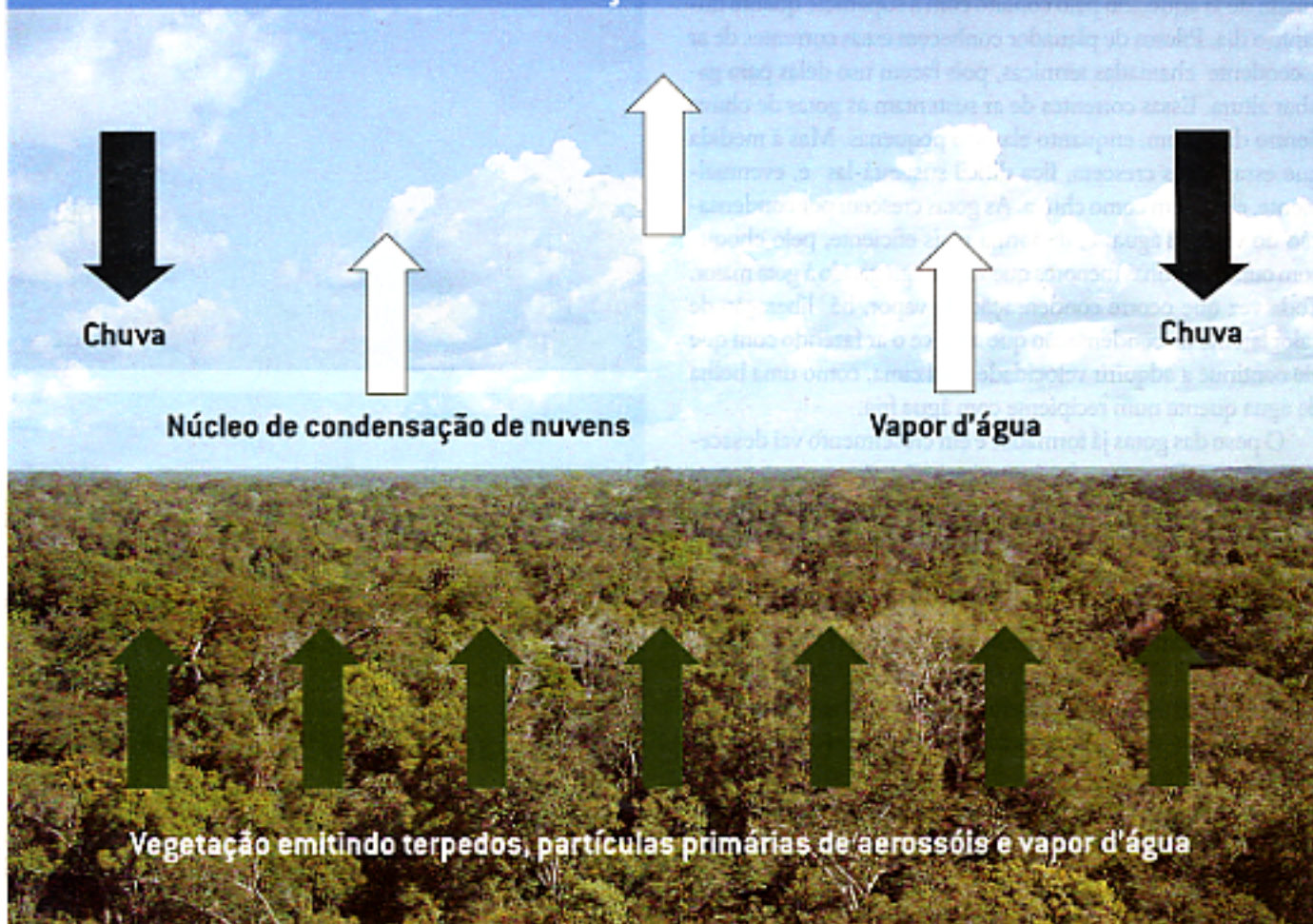


**NUVENS NATURAIS**, acima, são formadas por processos naturais, envolvendo liberação de micropartículas pela floresta



**FUMAÇA DE QUEIMADAS** interfere na formação de nuvens, alterando aspecto em comparação com formações naturais

## CONTROLE DE RADIAÇÃO E CHUVA NA AMAZÔNIA



limpa do ano, durante a estação chuvosa. Na época poluída pela fumaça de queimadas, as chuvas de nuvens rasas desaparecem e apenas raras chuvas, de nuvens profundas, são observadas, com relâmpagos e trovões. Às vezes, pedras de gelo, ou grânizo, são vistas caindo sobre a floresta, indicativo de que as correntes ascendentes são muito fortes e as pedrinhas cresceram até dois a três centímetros de diâmetro, sem tempo de derreter antes de atingir a superfície. Vê-se então que a chuva natural que seria benéfica, pode ser destruidora da vegetação pela violência das pedras de gelo.

As chuvas de nuvens rasas, na estação chuvosa, devolvem os NCNs à superfície praticamente no mesmo lugar em que foram gerados pela floresta. As nuvens profundas são carregadas pelos ventos mais fortes de altitude e viajam centenas de quilômetros de seu local de origem, exportando os NCNs no interior das gotas de chuva.

Essa alteração nas nuvens amazônicas (ver fotos da pág. 45) pode estar ocorrendo em relativa larga escala, mas só recentemente foram realizados experimentos científicos para estudos detalhados com uso de aviões.

Nuvens naturais e influenciadas por queimadas têm aspecto distinto. As fotos da pág. 45 mostram duas nuvens naturais, com altura máxima entre 3 a 4 mil metros, formadas por gotas com tamanho entre 10 a 20 micrômetros. Contrastando com esta imagem natural, a foto à direita registra nuvens formadas a partir de fumaça de queimadas, com maior desenvolvimento vertical e pequeno tamanho de gota, de cinco a 10 micrômetros.

### Aerossóis, nuvens e estado da atmosfera

PARA QUE A RADIAÇÃO SOLAR ATINJA A SUPERFÍCIE, passa através da atmosfera, que absorve pouca radiação na faixa do comprimento da luz visível, em condições naturais. Os gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e outros gases absorvem radiação na faixa de comprimento de onda do infravermelho, fazendo com que o calor que a Terra deveria emitir para o espaço, seja parcialmente refletido, aumentando a temperatura na superfície e permitindo que a Terra seja habitável.

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, ao longo do último século, fizeram com que as concentrações de  $\text{CO}_2$

subissem de 280 ppm (partes por milhão) no final do século 19 para os atuais 365 ppm, com a perspectiva de que no final deste século a concentração atinja de 600 a 800 ppm. Esse crescimento faz com que o balanço radiativo atmosférico seja alterado, aumentando a temperatura média na superfície terrestre.

As partículas de aerossóis, em geral, têm o efeito inverso ao interceptar a radiação solar antes que ela atinja a superfície, refletindo parte da radiação de volta ao espaço, ou absorvendo-a na atmosfera. O resultado líquido é que uma menor quantidade de radiação atinge a superfície. A menor temperatura da superfície gera térmicas menos intensas, com correntes ascendentes mais fracas, o que leva à menor capacidade da atmosfera em produzir nuvens de chuva.

O déficit de radiação global causado pelo aumento das concentrações de partículas de aerossóis é da ordem de -2 watts por metro quadrado, que se contrapõe ao efeito de aquecimento médio causado pelos gases de efeito estufa, com uma forçante radiativa positiva de +2,5 watts por metro quadrado. As nuvens também afetam de maneira importante o balanço radiativo terrestre, pois sua alta refletividade altera o albedo terrestre, taxa de reflexão da radiação solar pela superfície terrestre, e também por seu papel em aprisionar radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Na estação seca, devido às altíssimas concentrações de aerossóis na atmosfera, cerca de 30% da radiação solar incidente é absorvida, afetando fortemente o balanço radiativo atmosférico na Amazônia, mesmo em regiões longe das queimadas, pois essas partículas pequenas podem viajar milhares de quilômetros na atmosfera antes de serem depositadas na superfície. Esses efeitos afetam a saúde da floresta primária intacta, mesmo distante das áreas queimadas. Os cerca de 300 a 400 watts por metro quadrado de absorção local de radiação solar têm um efeito importante na redução da fotossíntese que sustenta a floresta.

## Nutrientes do ecossistema

O ECOSISTEMA AMAZÔNICO FUNCIONA COM LIMITAÇÕES significativas na quantidade de nutrientes, que são importantes para o funcionamento do metabolismo da vegetação. Em particular, o fósforo é um nutriente crítico, pois ele é o limitante maior no desenvolvimento e manutenção da floresta. Como o solo não ajuda muito nestes termos, a floresta, ao longo de seus anos de formação e desenvolvimento, tirou partido de mecanismos sofisticados para não perder seus nutrientes críticos e, ao mesmo tempo, reciclá-los para manter a saúde do ecossistema como um todo. No caso do fósforo, a floresta cicla esse nutriente principalmente na fase de partículas de aerossóis, já que esse composto não possui componentes gasosos que possam participar da ciclagem.

Se a floresta emitisse partículas contendo fósforo durante o dia e na fração fina, ela certamente perderia parte deste nutriente, pois com a forte convecção atmosférica e o tempo de residência longo das partículas menores, este nutriente seria trans-

portado a longa distância, depositando-se em locais em que não beneficiaria o ecossistema local. Mas, ao contrário disso, a floresta emite partículas contendo fósforo, somente durante o período da noite, em partículas grossas, e nas partes mais baixas do dossel da floresta, minimizando ao máximo as chances de perda. É curioso como a evolução favoreceu o desenvolvimento de florestas com esse mecanismo, levando em conta a minimização da perda por convecção, advecção e maximizando a deposição perto do local onde essas partículas foram emitidas.

Em áreas oceânicas, uma parte dos NCNs consiste em partículas de aerossóis originadas pela oxidação atmosférica de um composto químico emitido por algas microscópicas, o DMS (sulfeto dimerila). É interessante que emissões de compostos por algas microscópicas sejam, em última análise, responsáveis pela precipitação e balanço de radiação em áreas oceânicas do globo.

Alguns pesquisadores conceituaram essa dependência como um dos fatores de realimentação biosfera-clima que poderiam atuar de acordo com a chamada hipótese de Gaia, pela qual a biosfera teria mecanismos ativos de controle ambiental do planeta. Essa hipótese não foi ainda apoiada por dados experimentais, mas é um quadro conceitual importante no entendimento dos processos de interação biosfera-clima na Terra.

A vegetação da Amazônia emite compostos gasosos chamados genericamente de Compostos Orgânicos Voláteis (COV), entre os quais estão os terpenos, que são oxidados na atmosfera gerando partículas pequenas, que crescem e tomam-se NCNs. Portanto, na Amazônia, existe o potencial de a vegetação atuar diretamente sobre o clima e o ciclo hidrológico. A vegetação também emite partículas biogênicas primárias que são importantes na formação de NCNs gigantes, muito eficientes na formação de gotas de nuvens que se precipitam rapidamente. A evapotranspiração da vegetação é a maior fonte de vapor d'água em regiões tropicais, adicionando ingredientes-chave na formação de nuvens em regiões tropicais (*ver arte na pág. 46*).

A Floresta Amazônica é um patrimônio de importância estratégica para o Brasil, e um dos piores usos dos serviços ambientais que a floresta pode prestar e da biodiversidade que ela possui é queimá-la e transformar todo esse patrimônio ambiental em CO<sub>2</sub> e vapor d'água. O valor estratégico da Amazônia neste século é enorme, e cabe à comunidade científica auxiliar no desenvolvimento de estratégias de uso sustentado desses valiosos recursos naturais. Como explorar o potencial econômico e ambiental da Floresta Amazônica sem destruí-la é um desafio importante para toda a sociedade brasileira. ■

## PARA CONHECER MAIS

Web site do experimento LBA: <http://lba.cptec.inpe.br/lba/>

IGBP Global Change Newsletter, Volume especial do experimento LBA, com 6 artigos discutindo os principais resultados do experimento. Volume 45, Março de 2001. Disponível em: [http://www.igbp.kva.se/uploads/nl\\_45.pdf](http://www.igbp.kva.se/uploads/nl_45.pdf)