

A2. A AMAZÔNIA EM PROCESSO DE MUDANÇAS AMBIENTAIS

PAULO EDUARDO ARTAXO NETTO¹, HENRIQUE DE MELO JORGE BARBOSA¹, JOEL FERREIRA DE BRITO¹, ELISA TOMÉ SENA¹, LUCIANA VARANDA RIZZO², GLAUBER GUIMARÃES CIRINO³, ANA MARIA YANEZ SERRANO³

INTRODUÇÃO

A Amazônia é uma região muito especial não somente do ponto de vista de sua biodiversidade e extensão tropical, mas também pelos fortes mecanismos de interação com a atmosfera e o clima regional e global (Artaxo *et al.*, 2013). A biologia da floresta controla uma série de processos críticos para a precipitação regional, bem como o controle da concentração de gases e partículas na atmosfera. A interação entre a floresta e a atmosfera é mediada por uma série de processos associados ao funcionamento biológico da floresta, como a respiração e fotossíntese (caso do CO₂), sinalização e resposta a *stress* ambiental (casos dos compostos orgânicos voláteis - COV) e na emissão de partículas de aerossóis biogênicas (Davidson e Artaxo, 2004, Artaxo e Hansson, 1995). As emissões de partículas biogênicas pela floresta que controlam a população de “Cloud Condensation Nuclei” (CCN) na atmosfera são um ingrediente essencial no ciclo hidrológico da região amazônica (Pöschl *et al.*, 2010). A Figura A2.1 ilustra as complexas interações entre a floresta e a atmosfera, onde a floresta controla emissões de acordo com uma série de processos associados ao seu metabolismo. É impossível a separação entre a biologia, química e física dos processos associados. A transpiração da floresta domina o fluxo de vapor de água na atmosfera amazônica e a reciclagem de água ao longo do ecossistema (Andreae *et al.*, 2002). Mas a vegetação faz outro papel fundamental,

1. Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF/USP), Rua do Matão, Travessa R, 187, CEP 05508-090, São Paulo, Brasil.

2. Departamento de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP - Campus Diadema, Rua Prof. Artur Riedel, 275, CEP 09972-270, Diadema - São Paulo, Brasil.

3. INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Av. André Araújo, 2.936 - CEP 69067-375, Manaus, Brasil.

lançando na atmosfera COVs que se transformam em partículas de aerossóis que evoluem para CCN e afetam propriedades de nuvens. Estas partículas atuam como CCN, nucleando gotas de nuvens e afetando a precipitação e o balanço radiativo atmosférico através da mudança na refletividade de nuvens (Martin *et al.*, 2010, Artaxo *et al.*, 1988). Estas fortes associações entre a floresta e a atmosfera fazem do ecossistema amazônico um ambiente único em nosso planeta. Uma abordagem científica integrada é fundamental no estudo do efeito dos ecossistemas no clima regional e global e vice versa (Artaxo, 2012). Trabalhos recentes (Poehlker *et al.*, 2012) mostram que mesmo partículas tão pequenas quanto 20 a 30 nanômetros possuem traços de sais emitidos pela vegetação como o potássio em sua constituição, mostrando que mesmo partículas nanométricas tem origem em emissões da vegetação. Estas partículas biogênicas também atuam como núcleos de condensação de gelo, do inglês “Ice Nuclei” (IN), que são responsáveis pela formação de nuvens convectivas que atingem até 15-19 km de altura na Amazônia e são responsáveis pela maior parte da taxa de precipitação na região (Prenni *et al.*, 2009).

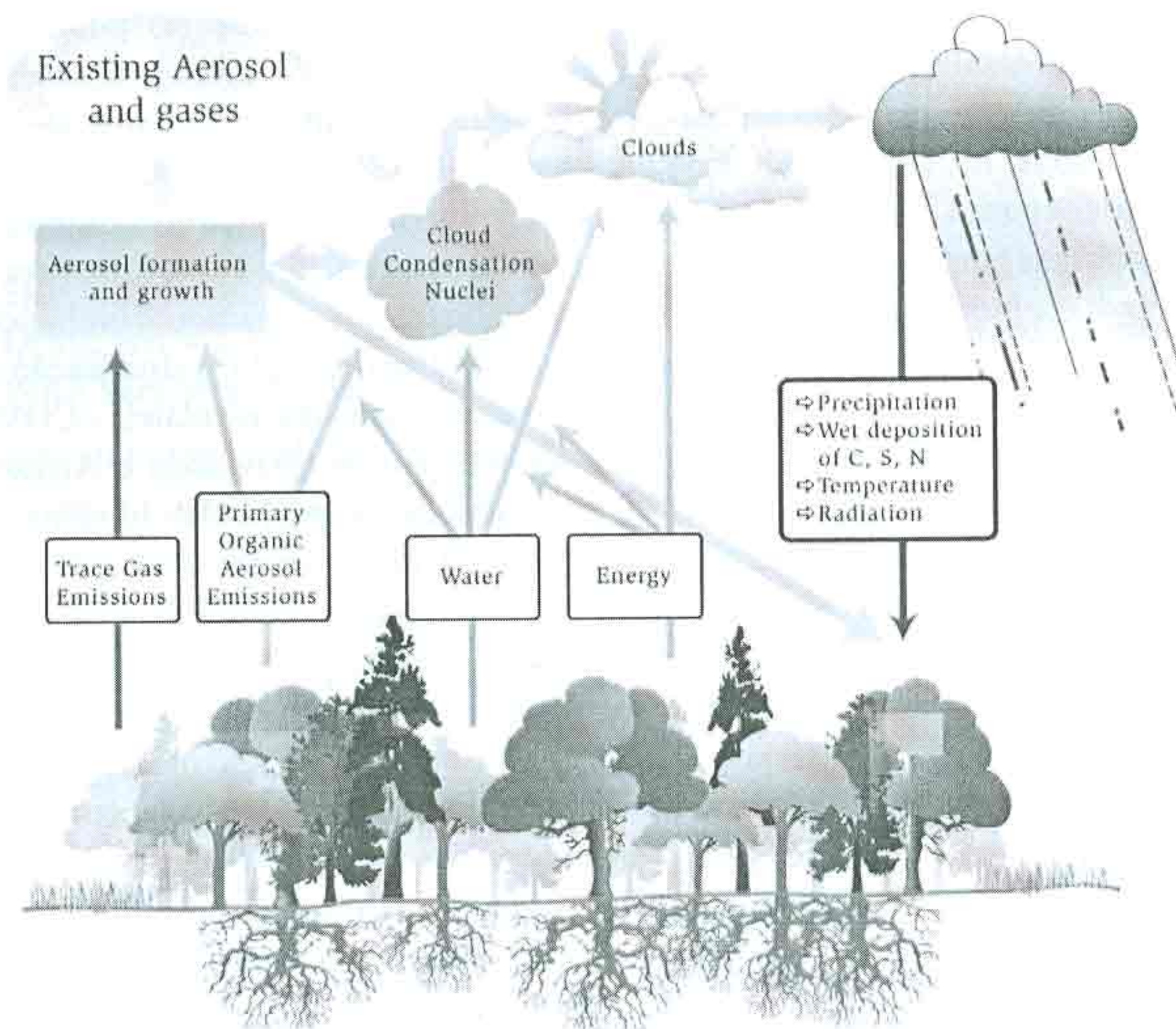


Figura A2.1: Esquema dos principais mecanismos de interação entre a biosfera e atmosfera da Amazônia, onde o funcionamento biológico da floresta determina uma série de propriedades de aerossóis, gases traços e nuvens na atmosfera amazônica.

A Amazônia é criticamente importante no ciclo do carbono global, pois contém cerca de 95 a 120 PgC na biomassa viva, e cerca de 160 PgC adicionais no solo (Malhi *et al.*, 2006, Gloor *et al.*, 2012), que se forem mobilizados à atmosfera podem intensificar rapidamente o efeito estufa, responsável pelo atual aumento de temperatura global. Estudos recentes mostram um potencial de forte modulação na absorção ou emissão de carbono pelo ecossistema amazônico devido a forçantes climáticas e às alterações no balanço de radiação (Phillips *et al.*, 2009, Cirino *et al.*, 2013, Quesada *et al.*, 2012, Booth *et al.*, 2012). Os efeitos das mudanças climáticas na Amazônia indicam que o ciclo hidrológico poderia ser alterado, com menor taxa de precipitação, especialmente na região leste da Amazônia, afetando fortemente os estoques de carbono (Marengo *et al.*, 2008, 2011, Malhi *et al.*, 2009). Duas fortes secas em 2005 e 2010 foram associadas com fortes perdas de carbono pelo ecossistema, aumentando a preocupação em relação à estabilidade e vulnerabilidade do ecossistema amazônico às mudanças climáticas globais em curso.

A região amazônica está sofrendo uma série de transformações associadas ao processo caótico de mudança de uso do solo ao longo das últimas décadas (Soares-Filho *et al.*, 2006, Gloor *et al.*, 2013). O trabalho de Davidson *et al.*, 2012 analisa os diferentes aspectos da transição que o ecossistema amazônico está sofrendo, observando que a expansão da agricultura e a variabilidade climática tornaram-se importantes agentes de alterações do ecossistema amazônico. É possível observar sinais que indicam uma transição para um regime dominado por alterações ambientais, em particular no ciclo hidrológico e no balanço de energia nas porções sul e este da bacia. As interações entre a mudança de uso de solo, incêndios florestais, hidrologia, mudanças climáticas e dimensões humanas na Amazônia formam um quadro complexo com potenciais efeitos fortes no desequilíbrio do ecossistema. A Figura A2.2 ilustra as interações entre mudanças globais, uso do solo, queimadas, hidrologia, ecologia e dimensões humanas na Amazônia. Nesta figura, os forçantes são indicados por ovais vermelhas, que afetam os processos, (mostrados em quadros verdes) e as consequências são mostradas nos quadros azuis. Setas indicam os relacionamentos entre estes processos, que interagem fortemente entre si e com o clima da região. Por exemplo, secas fortes como as de 1997, 2005 e 2010 afetam além dos processos fotossintéticos, também a emissão de COVs, aerossóis e vapor d'água, o que por si próprio realimenta a redução na precipitação. Cheias como as de 2009 e 2012 associadas a fenômenos La Niña também afetam as emissões de metano e de vapor de água para a atmosfera regional e global, novamente realimentando o funcionamento do ecossistema (Marengo *et al.*, 2008).

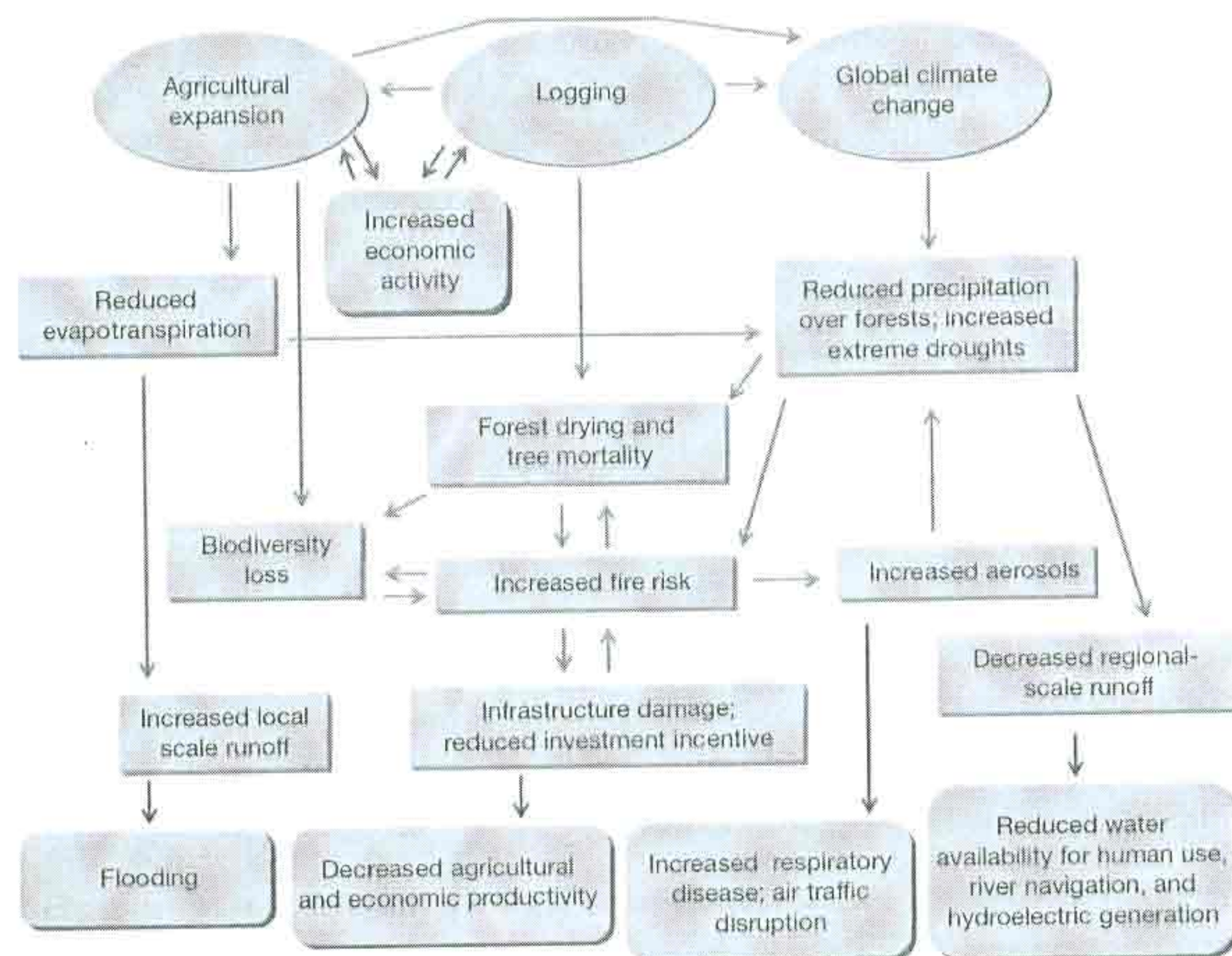


Figura A2.2: Interações entre mudanças globais, uso do solo, queimadas, hidrologia, ecologia e dimensões humanas na Amazônia. Os forçantes são indicados por ovais vermelhas, que afetam os processos, (mostrados em quadros verdes) e as consequências mostradas nos quadros azuis. Setas indicam os relacionamentos entre estes processos.

Evidências recentes mostram que o ciclo hidrológico na Amazônia pode estar se intensificando nas últimas duas décadas (Gloor *et al.*, 2013). Esta intensificação do ciclo hidrológico é concentrada na estação chuvosa, com aumento de amplitude entre as cheias e vazantes. Esta intensificação do ciclo hidrológico pode estar associada a uma maior temperatura da superfície do Oceano Atlântico tropical, ou também à variabilidade decadal da circulação tropical no Atlântico. Observa-se que a vazão do Rio Amazonas em óbitos está em processo de forte aumento nos últimos 20 anos, como resultado do aumento da taxa de precipitação na bacia (Gloor *et al.*, 2013). É fundamental que tenhamos séries temporais de observações em longo prazo para uma correta atribuição das mudanças observadas no momento no ciclo hidrológico e vazão do Amazonas.

Do ponto de vista de ciclagem de carbono, os últimos trabalhos indicam que a Amazônia é neutra em termos de emissão/absorção de carbono nos últimos anos (Gloor *et al.*, 2012). A Amazônia passou de ser uma fonte de 0.3-0.4 PgC por ano na década de 80 para uma certa neutralidade atual. A absorção de carbono por florestas intactas, da ordem de -0.51 PgC a^{-1} equilibra de certo modo as emissões de carbono por desmatamento (Malhi *et al.*,

2006). Ao longo das décadas de 80-90, resultados do projeto RAINFOR mostraram que as florestas intactas da Amazônia estavam absorvendo carbono à uma taxa da ordem de 0.5 ton C/ha/ano. Durante a seca de 2009, esta absorção de carbono mudou para uma perda líquida de carbono devido ao *stress* hídrico experimentado em 2009. Observamos que a precipitação e a temperatura em aumento alteram a taxa fotossintética do ecossistema, mas ainda é difícil estabelecer uma relação entre causa e efeito no complexo ciclo de carbono amazônico.

Um dos grandes sucessos da política ambiental do Brasil foi a queda nas taxas de desmatamento da Amazônia (Artaxo, 2010). É importante salientar que as causas da redução das taxas de desmatamento ainda não são claras, e entre as hipóteses estão as alterações nos preços de *commodities*, maior fiscalização, controle ao financiamento bancário de empreendimentos na Amazônia, entre outros. A figura A2.3 mostra a série temporal do desmatamento anual, realizada pelo sistema de monitoramento de desmatamento operado pelo INPE. De uma taxa de desmatamento de 27.772 Km² em 2003-2004, tivemos uma redução para uma taxa de 4.571 Km² em 2011-2012. No último ano (2012-2013), a taxa de desmatamento sofreu um aumento para 5.843 km² por ano, o que coloca dúvidas na sustentabilidade a longo prazo das políticas públicas de controle de desmatamento na Amazônia. A contínua estratégia de desenvolvimento da Amazônia é baseada principalmente na mudança de uso de solo para criação de novas áreas agriculturáveis ou de pastagens. Esta estratégia deverá ser alterada se o Brasil reafirmar objetivo de redução das emissões de gases de efeito estufa, como a atual legislação preconiza. Houve uma forte redução das emissões de gases de efeito estufa pelo Brasil, mas esta redução deve se sustentar a longo prazo para que seja efetiva. É importante que tenhamos clareza de que, apesar de o Brasil ter tido um grande sucesso na redução do desmatamento de 2004 a 2012, vai ser cada vez mais difícil reduzir essa taxa a zero. A extensão da Amazônia e sua heterogeneidade econômica e social trazem desafios enormes. E se o país quiser seguir uma trajetória exemplar na redução de emissões de GEE não poderá abrir mão de políticas públicas integradas entre os governos municipais, estaduais e federal e também de muita fiscalização efetiva.

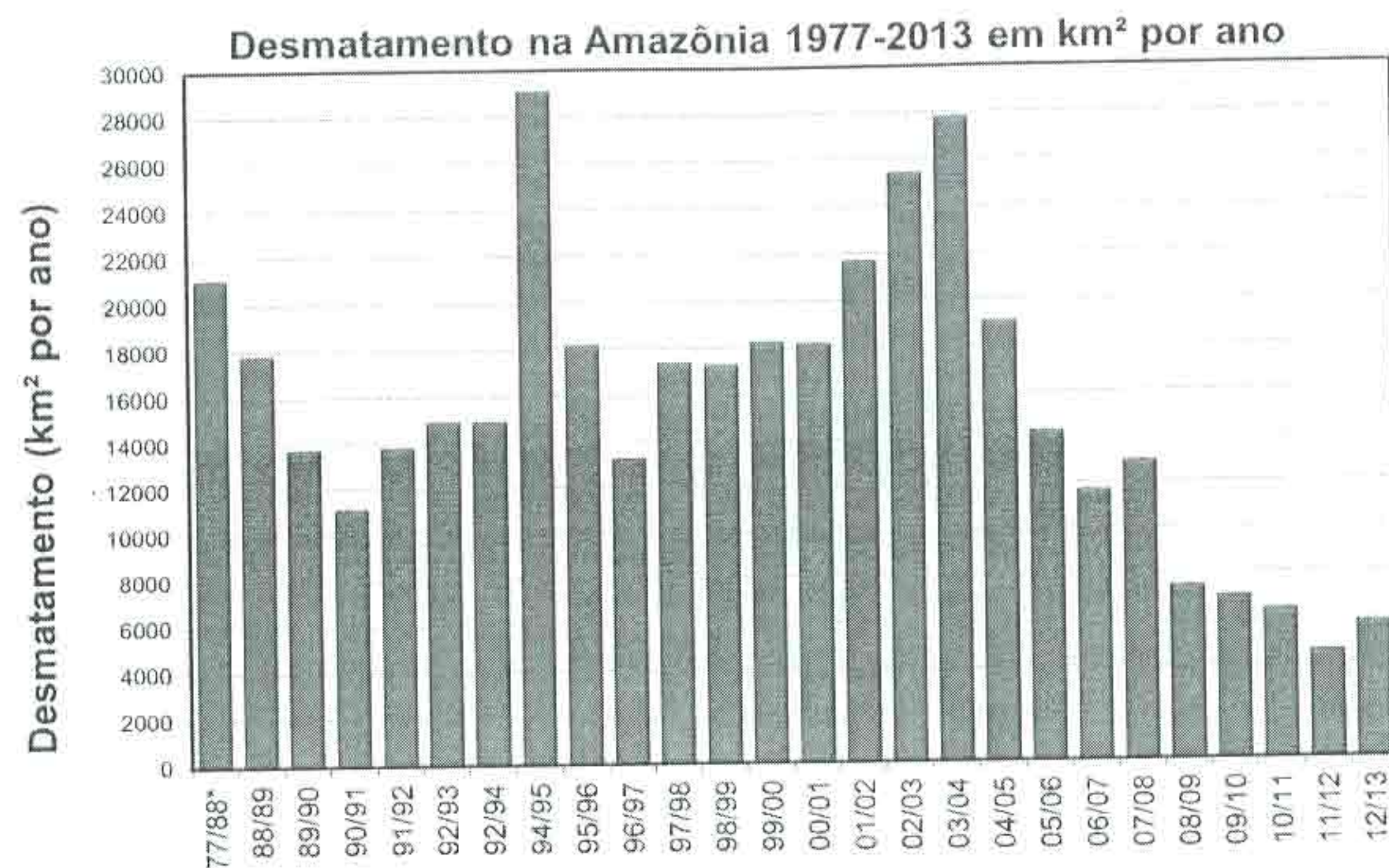


Figura A2.3: Taxas anuais de desmatamento na Amazônia de 1977 a 2013 segundo dados do sistema de monitoramento de desmatamento do INPE.

O complexo ciclo hidrológico da região amazônica ainda é muito pouco compreendido, e experimentos realizados na última década elucidaram alguns mecanismos chaves na formação de nuvens naturais e das influenciadas por partículas de queimadas na Amazônia (Artaxo *et al.*, 2009, Andreae *et al.*, 2004, Clayer *et al.*, 2004, Silva Dias *et al.*, 2002). Observou-se uma forte supressão da formação de nuvens rasas formadas a partir de aerossóis de queimadas, com possível impacto no ciclo hidrológico, em magnitude ainda a ser quantificada. A rede de radares meteorológicos do SIPAM/SIVAM está sendo utilizada para quantificar esta possível redução da precipitação pelo efeito das emissões de aerossóis em queimadas. Com o transporte a longa distância das emissões, o efeito da supressão de nuvens rasas certamente não se restringe somente à região amazônica. Está sendo investigado com técnicas de modelamento e medidas por sensoriamento remoto em alta resolução o possível impacto das emissões de queimadas no ciclo hidrológico no Sul do Brasil e na América do Sul em geral. As emissões de queimadas produzem ozônio em larga escala, e o ozônio é um gás fitotóxico. Estas emissões em queimadas de gases precursores de ozônio podem estar afetando a produtividade primária da floresta e culturas em áreas longe das regiões de queimadas (Davidson *et al.*, 2013).

O EFEITO DE PARTÍCULAS DE AEROSSÓIS NO BALANÇO RADIATIVO DA REGIÃO AMAZÔNICA

As partículas de aerossol na troposfera influenciam significativamente o clima regional e global, alterando o equilíbrio de energia radiativo, bem como o ciclo hidrológico (Forster *et al.*, 2007). As partículas de aerossóis podem espalhar e absorver radiação solar afetando diretamente o balanço radiativo terrestre (Boucher *et al.*, 2013). Este efeito depende da concentração, composição, tamanho, propriedades óticas e das distribuições horizontal e vertical dos aerossóis na atmosfera (Huffman *et al.*, 2012, Rizzo *et al.*, 2012). O balanço radiativo terrestre pode ser perturbado através de: i) alterações na quantidade de radiação solar incidente (por exemplo, mudanças na órbita terrestre; ii) alterações na fração de radiação solar que é refletida de volta para o espaço (mudanças na cobertura de nuvens, quantidade de partículas atmosféricas ou na refletividade da superfície terrestre; e iii) alterações na quantidade de radiação de onda longa emitida pela Terra de volta para o espaço (por exemplo, variações na concentração de gases de efeito estufa). O clima, por sua vez, pode ser afetado diretamente por essas mudanças, bem como indiretamente, através de diversos mecanismos de retroalimentação (do inglês, *feedbacks*) (Boucher *et al.*, 2013). Perturbações externas impostas no balanço de energia radiativa do sistema climático terrestre podem causar uma alteração no fluxo de radiação no topo da atmosfera, denominada forçante radiativa climática. De acordo com a definição adotada pelo IPCC, a forçante radiativa é definida como a diferença na irradiância líquida na tropopausa, entre um estado de referência e um estado perturbado por um agente climático externo (Boucher *et al.*, 2013, Forster *et al.*, 2007). Forçantes radiativas positivas indicam um efeito líquido de aquecimento do sistema Terra-atmosfera e forçantes negativas indicam efeitos de resfriamento.

Sena *et al.*, 2013 calcularam a forçante radiativa em toda a extensão espacial da Amazônia, levando em conta as emissões de aerossóis de queimadas, as alterações de albedo de superfície e também as alterações na coluna de vapor de água em áreas de florestas e de pastagens. Foram realizadas medidas simultâneas dos sensores CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) e MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*), a bordo do satélite Terra, durante as estações secas de 2000 a 2009. A média diária da forçante radiativa direta no topo da atmosfera (TOA) para o período estudado foi de $-8,2 \pm 2,1 \text{ W/m}^2$ e $-5,2 \pm 2,6 \text{ W/m}^2$, dependendo da metodologia utilizada. As distribuições espaciais da forçante radiativa direta de aerossóis sobre a região amazônica mostram que, para altas concentrações de aerossóis (Aerosol Optical Depth, AOD, maior que 1), a média diária da forçante radiativa no topo da atmosfera pode alcançar

valores elevados de até -30 W/m^2 (consistindo em um resfriamento). Observamos também que a refletância da superfície (o albedo terrestre) influencia fortemente o efeito radiativo direto de aerossóis. O impacto dos aerossóis sobre diferentes tipos de superfície foi analisado, indicando que a forçante radiativa é sistematicamente mais negativa sobre áreas de floresta do que sobre áreas de cerrado. A média anual da forçante radiativa de mudança de albedo de superfície devida ao desflorestamento em Rondônia foi determinada, a partir de duas diferentes metodologias, em $-7,4 \pm 0,9 \text{ W/m}^2$ e $-8,1 \pm 1,0 \text{ W/m}^2$, respectivamente. As partículas de queimadas impactam o balanço radiativo por aproximadamente 2 a 3 meses por ano, enquanto o impacto do albedo de superfície pode ser observado ao longo de todo o ano. Esta diferença, devida à sazonalidade da estação de queimadas, indica que a média anual do impacto da mudança de albedo de superfície sobre o balanço radiativo amazônico é muito maior do que o impacto anual das partículas de aerossóis de queimadas. A influência do desmatamento na quantidade de vapor d'água atmosférico e seu impacto no balanço radiativo foi analisada a partir de medidas de vapor d'água integrado na coluna atmosférica obtidas pelos radiômetros solares da AERONET. Estas medidas mostram que a quantidade de vapor d'água integrado na coluna atmosférica é $0,35 \text{ cm}$ (cerca de 10% do total) menor sobre áreas desmatadas do que sobre áreas de florestas preservadas. Este decréscimo contribui para o aumento do impacto do desflorestamento no balanço radiativo de ondas curtas que varia entre $0,4$ e $1,2 \text{ W/m}^2$. Os altos valores de forçante radiativa determinados indicam que o desflorestamento pode ter forte implicação para a convecção, para o desenvolvimento de nuvens e para a razão entre radiação direta e difusa, afetando o balanço de carbono na Amazônia.

A figura A2.4 apresenta a distribuição espacial da forçante radiativa de aerossóis emitidos em queimadas, calculada para a estação seca de 2005 (Sena *et al.*, 2013). Valores são apresentados para o topo da atmosfera, na faixa de radiação de onda curta (SWARF), calculada para médias de 24 horas. A média da forçante radiativa de 24 horas ao longo do período de 2000 a 2009 foi de -6.5 W/m^2 em áreas de floresta e -3.3 W/m^2 em áreas de cerrado. Valores de até -30 W/m^2 foram observados localmente para a média diária da SWARF 24h. Ambos os valores são extremamente elevados e causam um resfriamento da superfície. Estes altos valores podem ser comparados com a forçante dos gases de efeito estufa que é de um aquecimento de $+2.6 \text{ W/m}^2$ (Forster *et al.*, 2007).

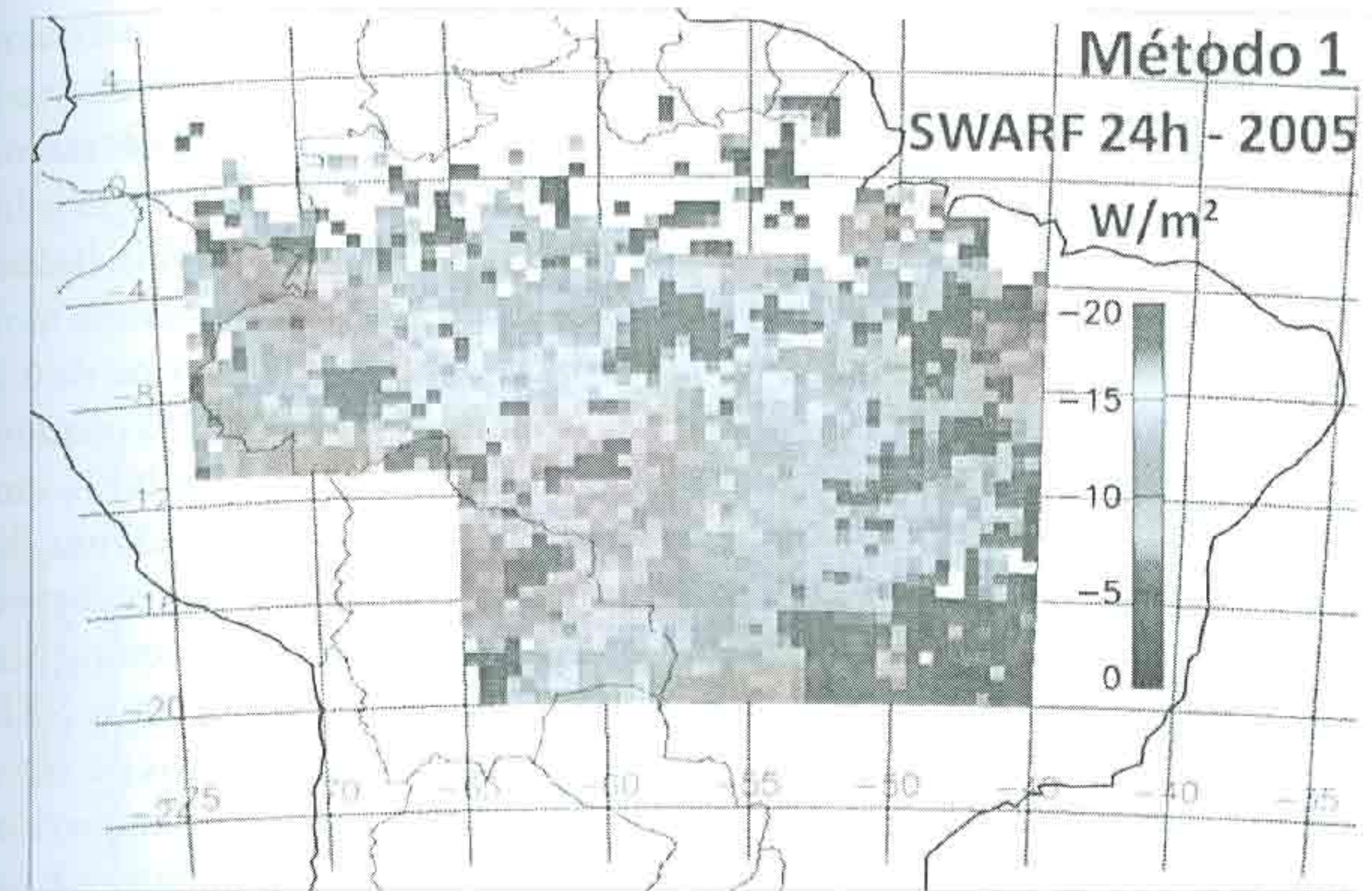


Figura A2.4: Distribuição espacial da forçante radiativa de aerossóis emitidos em queimadas calculada para a estação seca de 2005. Valores para o topo da atmosfera, na faixa de radiação de onda curta (SWARF), calculada para médias de 24 horas. (Sena *et al.*, 2013)

O EFEITO DE PARTÍCULAS DE AEROSSÓIS NO FLUXO DE CARBONO DA REGIÃO AMAZÔNICA

Além de causarem um esfriamento na superfície, as partículas de aerossóis também tem outro efeito importante no ecossistema, que é o de aumentar a taxa de radiação difusa comparada com a radiação direta (Yamasoe *et al.*, 2006, Oliveira *et al.*, 2007). Vários trabalhos realizados na Amazônia analisaram este efeito de alteração no balanço de radiação (por exemplo: Procópio *et al.*, 2003, 2004, Schafer *et al.*, 2002, 2008). O trabalho de Cirino *et al.*, 2013 estudou os efeitos das alterações no balanço radiativo devido a aerossóis e nuvens, sobre a fixação líquida de carbono (Net Ecosystem Exchange - NEE) por ecossistemas de floresta primária de Rondônia e da Amazônia central, próximo a Manaus. Foi avaliado também o impacto dos aerossóis sobre alguns dos principais fatores ambientais que afetam diretamente a atividade fotossintética dos vegetais, como a temperatura do ar e umidade relativa. Um modelo de irradiância de céu claro foi desenvolvido e utilizado para determinar a irradiância relativa (f), utilizada para quantificar a radiação solar extinta (absorvida e espalhada) devido à presença de aerossóis e nuvens na atmosfera. As medidas de espessura óptica de aerossóis foram realizadas com o sensor MODIS, validadas previamente com medidas de fotômetros solar da rede NASA/

AERONET (Aerosol Robotic Network). Os fluxos de carbono foram medidos por meio de técnicas de vórtices turbulentos (eddy-correlation) nas torres do experimento LBA. Dois ecossistemas de floresta constituíram os locais estudados, a Reserva Biológica do Jarú (localizada na região do arco do desflorestamento) e a Reserva Biológica do Cuieiras (localizada na Amazônia central). Na Reserva Biológica do Jarú foi observado um aumento de 29% na fixação de carbono (NEE) quando o AOT variou de 0,1 para 1,5. Já na Amazônia Central, este efeito foi da ordem de 26% quando o AOT variou de 0,10 para 0,50. O aumento de 29% e 26% do NEE, em ambos os sítios, é atribuído ao aumento de até 50% da fração difusa da radiação solar em relação à fração direta desta radiação. Para reduções ainda maiores da radiação solar incidente, associada a altas concentrações de aerossóis na atmosfera e/ou devido à alta cobertura de nuvens, o NEE passa a sofrer reduções significativas, até atingir valores próximos de zero, devido à ausência de luminosidade em quantidades suficientes, requerida pelo processo de fotossíntese. Alterações importantes na temperatura e na umidade relativa do ar pela interação da radiação solar com a alta carga de aerossóis emitidos em queimadas, também foram estudadas em ambos os sítios. Tendo em vista o transporte de aerossol em larga escala durante as queimadas, alterações no fluxo de carbono podem estar ocorrendo em amplas áreas na Amazônia, com importantes mudanças no potencial para os ecossistemas florestais absorverem quantidades significativas de CO_2 atmosférico.

A figura A2.5 ilustra as mudanças relativas na taxa de fixação de carbono expressa como Net Ecosystem Exchange (NEE) e também como o fluxo de carbono bruto. Os resultados são apresentados para a torre do LBA K34 na reserva ecológica ZF2, em Manaus (à esquerda) e as mesmas quantidades para a torre de fluxos da Rebio Jarú em Rondônia (à direita). Observa-se que quando a quantidade de aerossóis aumenta de uma espessura ótica (AOD) de 0.1 (condições de background) para 0.5, que correspondente a uma mudança na irradiância relativa de 1.0 a 0.75, ocorre um forte aumento no fluxo de carbono, expresso como NEE e FluxC para os dois locais. No sítio K34 o aumento de 26 e 17% nas medidas de fluxo estão associadas ao aumento da AOT de 0,10 para 0,50. Já no sítio RBJ as variações da AOT, capazes de produzir o incremento mencionado de 26 e 17% nas medidas de fluxo, foram de 0,10 para 1,4, respectivamente. Os aerossóis de queimadas também produziram reduções de até 40% nas quantidades de radiação total solar incidente e também um aumento de 40-50% na radiação PAR (difusa), que é mais eficientemente utilizada pelo dossel da floresta no processo de fotossíntese. Os resultados mostram uma maior eficiência fotossintética nas situações em que a atmosfera encontra-se carregada de partículas e/ou nuvens. Um maior aproveitamento da fração difusa da radiação solar pode ser apontado como a principal causa do aumento da fixação de CO_2

nas áreas de floresta dos sítios estudados (Cirino *et al.*, 2013). Quando a espessura ótica de aerossóis aumenta além de 0.5 (em 550 nm) observamos uma forte redução na assimilação de carbono pelo ecossistema, como esperado por causa da redução do fluxo de radiação fotossinteticamente ativa (PAR). A redução na incidência de radiação causou um resfriamento de 2 graus centígrados na superfície em ambos os locais estudados.

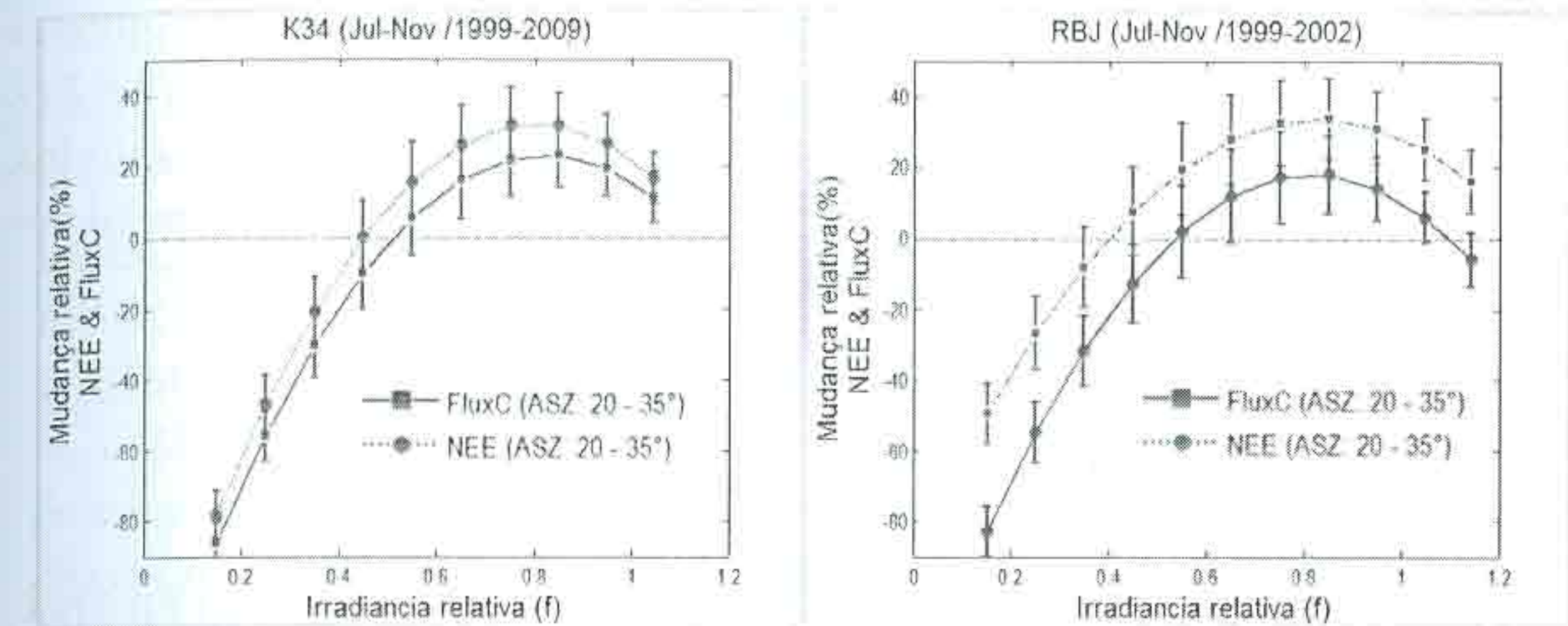


Figura A2.5: Mudança relativa na taxa de fixação de carbono expressa como “Net Ecosystem Exchange” (NEE) e também como o fluxo de carbono bruto para a torre do LBA K34 na reserva ecológica ZF2, em Manaus (à esquerda) e as mesmas quantidades para a torre de fluxos da Rebio Jarú em Rondônia (à direita). A irradiância relativa expressa a redução no fluxo de radiação devido à carga de aerossóis na atmosfera. Para detalhes, consulte Cirino *et al.*, 2013.

CONCLUSÕES

A região amazônica está sofrendo um processo de mudança de uso de solo importante, com impactos no funcionamento do ecossistema amazônico e no clima da região e também com efeitos globais. Diversos novos experimentos estão sendo realizados na região, tais como o experimento GoAmazon 2014-2015, visando entender o impacto que as mudanças de uso de solo na região estão tendo no ciclo hidrológico e na taxa de fixação de carbono no ecossistema. Ainda estamos longe de entender os processos chaves que regulam o funcionamento biológico, químico e físico do ecossistema, mas é fundamental que uma política de prevenção ao desmatamento seja implantada e seguida na Amazônia, pois os danos ao ecossistema podem ser irreversíveis. Outra ameaça vem na forma das mudanças climáticas globais, com potenciais alterações no clima da região, que podem afetar o armazenamento de carbono, o ciclo hidrológico e a estabilidade do ecossistema.

Agradecemos ao INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) que coordena o Programa LBA (Experimento de Larga Escala da Biosfera e Atmosfera da Amazônia) pelo suporte aos vários sítios de pesquisa utilizado neste trabalho. Esta pesquisa foi financiada pela FAPESP através dos projetos 2008/58100-2, 2010/52658-1, 2011/50170-4, 2012/14437-9 e 2013/05014-0. Também agradecemos ao CNPq através dos projetos 475735-2012-9, INCT Amazônia e Projeto Universal 475735/2012-9. Agradecemos a Fernando G. Morais, Alcides C. Ribeiro, Ana L. Loureiro, Fábio de Oliveira Jorge e Simara Morais, pelo suporte técnico essencial nos diversos sítios de pesquisas que utilizamos na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ANDREAE, M.O.; 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, 1337-1342, 2004.

ANDREAE, M. O.; e co-autores. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8066 – 8091, 2002.

ARTAXO, P.; Break down boundaries in climate research. World View Section, *Nature*, v. 481, p. 239, 2012.

ARTAXO, P.; HANSSON, H-C. Size distribution of biogenic aerosol particles from the Amazon basin. *Atmospheric Environment*, v. 29, n. 3, p. 393-402, 1995.

ARTAXO, P., RIZZO, L. V.; J. F. BRITO, H. M. J. BARBOSA, A. ARANA, E. T. SENA, G. G. CIRINO, W. BASTOS, S. T. MARTIN, M. O. ANDREAE. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discussions*, DOI:10.1039/C3FD00052D, 2013.

ARTAXO, P., RIZZO, L. V.; PAIXAO, M.; DE LUCCA, S.; OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.; WIEDEMANN, K. T.; ANDREAE, M. O.; HOLBEN, B.; SCHAFER, J.; CORREIA, A. L.; PAULIQUEVIS, T. M.; Aerosol particles in Amazonia: Their composition, role in the radiation balance, cloud formation and nutrient cycles. In: Amazonia and Global Change, Ed. M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, P. S. Dias. *American Geophysical Union, Geophysical Monograph 186*, pg. 235-254, ISBN: 978-0-87590-449-8, 2009.

ARTAXO, P., Reductions in deforestation rates in Amazonia. *Global Atmospheric Pollution Forum Newsletter*, v.8, p. 2-3, 2010.

ARTAXO, P.; STORMS, H.; BRUYNSEELS, F.; VAN GRIEKEN, R.; MAENHAUT, W. Composition and sources of aerosols from the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 1605-1615, 1988.

BOOTH, B. B. B., C. D. JONES, M. COLLINS, I. J. TOTTERDELL, P. M. COX, S. SITCH, C. HUNTINGFORD, R. A. BETTS, G. R. HARRIS e J. LLOYD, High sensitivity of future global warming to land carbon cycle processes, *Environ. Res. Lett.*, 7, 1–8, 2012.

BOUCHER, O., D. RANDALL, P. ARTAXO, C. BRETHERTON, G. FEINGOLD, P. FORSTER, V.-M. KERMINEN, Y. KONDO, H. LIAO, U. LOHMANN, P. RASCH, S. K. SATHEESH, S. SHERWOOD, B. STEVENS e X. Y. ZHANG: Clouds and Aerosols. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

BOWMAN, D. M. J. S., J. K. BALCH, P. ARTAXO, W. J. BOND, J. M. CARLSON, M. A. COCHRANE, C. M. D. ANTONIO, R. S. DEFRIES, J. C. DOYLE, S. P. HARRISON, F. H. JOHNSTON, J. E. KEELEY, M. A. KRAWCHUK, C. A. KULL, J. BRAD MARSTON, M. A. MORITZ, I. C. PRENTICE, C. I. ROOS, A. C. SCOTT, T. W. SWETNAM, G. R. VAN DER WERF, e S. J. PYNE, Fire in the Earth System. *Science*, 324, 481-484, DOI: 10.1126/science.1163886, 2009.

CIRINO, G.G., R. F. SOUZA, D. K. ADAMS e P. ARTAXO. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in Amazonia. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 14, p. 6523–6543, doi:10.5194/acp-14-6523-2014, 2014.

CLAEYS, M., B. GRAHAM, G. VAS, W. WANG, R. VERMEYLEN, V. PASHYNSKA, J. CAFMEYER, P. GUYON, M. O. ANDREAE, P. ARTAXO, e W. MAENHAUT, Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene. *Science*, v. 303, p. 1173-1176, 2004.

DAVIDSON, E. A., A. C. DE ARAÚJO, P. ARTAXO, J. K. BALCH, I. F. BROWN, M. M. DA C. BUSTAMANTE, M. T. COE, R. S. DEFRIES, M. KELLER, M. LONGO, J. W. MUNGER, W. SCHROEDER, B. S. SOARES-FILHO, C. M. SOUZA JR., S. C. WOFSY. The Amazon Basin in Transition. *Nature*, v. 481, p. 321-328, doi:10.1038/nature10717, 2012.

DAVIDSON, E. A., e P. ARTAXO, Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. *Global Change Biology*, v. 10, p. 519-529, 2004.

FORSTER, P., V. RAMSWAMY, P. ARTAXO, T. BERNTSEN, R. A. BETTS, D. W. FAHEY, J. HAYWOOD, J. LEAN, D. C. LOWE, G. MYHRE, J. NGANGA, R. PRINN, G. RAGA, M. SCHULZ, R. VAN DORLAND. Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing. Chapter 2 of the Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change Book, Cambridge University Press, UK, 2007.

GLOOR, M., GATTI, L., BRIENEN, R., FELDPAUSCH, T. R., PHILLIPS, O. L., MILLER, J., OMETTO, J. P., ROCHA, H., BAKER, T., DE JONG, B., HOUGHTON, R. A., MALHI, Y., ARAGÃO, L. E. O. C., GUYOT, J.-L., ZHAO, K., JACKSON, R., PEYLIN, P., SITCH, S., POULTER, B., LOMAS, M., ZAEHLE, S., HUNTINGFORD, C., LEVY, P., e LLOYD, J.: The carbon balance of South America: a review of the status, decadal trends and main determinants. *Biogeosciences*, v. 9, p. 5407-5430, doi:10.5194/bg-9-5407-2012, 2012.

GLOOR, M., R. J. W. BRIENEN, D. GALBRAITH, T. R. FELDPAUSCH, J. SCHÖNGART, J.-L. GUYOT, J. C. ESPINOZA, J. LLOYD, e O. L. PHILLIPS. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys Res Lett*, v. 40, p. 1-5, doi:10.1002/grl.50377, 2013.

HUFFMAN, J. A., B. SINHA, R.M. GARLAND, A. SNEE-POLLMANN, S.S. GUNTHER, P. ARTAXO, S.T. MARTIN, M.O. ANDREAE, e U. PÖSCHL. Size distributions and temporal variations of biological aerosol particles in the Amazon rainforest characterized by microscopy and real-time UV-APS fluorescence techniques during AMAZE-08. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 12, p. 11997-12019, doi:10.5194/acp-12-11997-2012, 2012.

MALHI, Y. ET AL. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests, *Global Change Biol.*, v. 12, p. 1-32. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x, 2006.

MALHI, Y., L. E. O. C. ARAGÃO, D. GALBRAITH, C. HUNTINGFORD, R. FISHER, P. ZELAZOWSKI, S. SITCH, C.MCSWEENEY, P. MEIR, Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rain forest, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, v. 106, p. 20610-20615, 2009.

MARENGO, J. A., C. A. NOBRE, J. TOMASELLA, M. F. CARDOSO, e M. D. OYAMA, Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005, *Philos. Trans. R. Soc., B*, v. 363, p. 1773-1778, doi:10.1098/rstb.2007.0015, 2008.

MARENGO, J. A., J. TOMASELLA, L. M. ALVES, W. R. SOARES, e D. A. RODRIGUEZ. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region, *Geophys Res Lett*, v. 38, p. L12703 doi:10.1029/2011GL047436, 2011.

MARTIN, S. T., M. O. ANDREAE, P. ARTAXO, D. BAUMGARDNER, QI CHEN, A. H. GOLDSTEIN, A. B. GUENTHER, C. L. HEALD, O. L. MAYOL-BRACERO, P. H. MCMURRY, T. PAULIQUEVIS, U. PÖSCHL, K. A. PRATHER, G. C. ROBERTS, S. R. SALESKA, M. A. SILVA DIAS, D. V. SPRACKLEN, E. SWIETLICKI, e I. TREBS. Sources and Properties of Amazonian Aerosol Particles. *Review of Geophysics*, v. 48, Article number RG2002, DOI: 10.1029/2008RG000280, 2010.

MARTIN, S.T., M. O. ANDREAE, D. ALTHAUSEN, P. ARTAXO, H. BAARS, S. BORRMANN, Q. CHEN, D. K. FARMER, A. GUENTHER, S. S. GUNTHER, J. L. JIMENEZ, T. KARL, K. LONGO, A. MANZI, T. PAULIQUEVIS, M. D. PETERS, A. J. PRENNI, U. PÖSCHL, L. V. RIZZO, J. SCHNEIDER, J. N. SMITH, E. SWIETLICKI, J. TOTA, J. WANG, A. WIEDENSOHLER, e S. R. ZORN. An overview of the Amazonian Aerosol Characterization Experiment 2008 (AMAZE-08). *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p. 18139-18195, doi:10.5194/acp-10-11415-2010, 2010.

OLIVEIRA, P. H. F.; P. ARTAXO, C. PIRES JR, S. DE LUCCA, A. PROCÓPIO, B. HOLBEN, J. SCHAFER, L. F. CARDOSO, S. C. WOFSY, H. R. ROCHA. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO2 flux in Amazonia. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, v. 59B, n. 3, 338-349. 2007.

PHILLIPS, O. L., ET AL. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, v. 323, p. 1344-1347, 2009.

POEHLKER, C., K. T. WIEDEMANN, B. SINHA, M. SHIRAIWA, S. S. GUNTHER, M. SMITH, H. SU, P. ARTAXO, Q. CHEN, Y. CHENG, W. ELBERT, M. K. GILLES, A. L. D. KILCOYNE, R. C. MOFFET, M. WEIGAND, S. T. MARTIN, U. POSCHL, M. O. ANDREAE, Biogenic potassium salt particles as seeds for secondary organic aerosol in the Amazon. *Science*, v. 337, p. 1075-1078, doi: 10.1126/science.1223264, 2012.

PÖSCHL, U., S. T. MARTIN, B. SINHA, Q. CHEN, S. S. GUNTHER, J. A. HUFFMAN, S. BORRMANN, D. K. FARMER, R. M. GARLAND, G. HELAS, J. L. JIMENEZ, S. M. KING, A. MANZI, E. MIKHAILOV, T. PAULIQUEVIS, M. D. PETERS, A. J. PRENNI, P. ROLDIN, D. ROSE, J. SCHNEIDER, H. SU, S. R. ZORN, P. ARTAXO, M. O. ANDREAE. Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. *Science*, v. 329, p. 1513-1516, 2010.

PRENNI, A. J., M. D. PETTERS, S. M. KREIDENWEIS, C. L. HEALD, S. T. MARTIN, P. ARTAXO, R. M. GARLAND, A. G. WOLLNY, U. POESCHL, Relative roles of biogenic emissions and Saharan dust as ice nuclei in the Amazon basin. *Nature Geosciences*, v. 2, p. 402-405, 2009.

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*, v. 31, n. 3, p. L03108–L03112, doi:10.1029/2003GL018646, 2004.

PROCOPIO, A. S., REMER, L. A., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y. J., HOLBEN, B. N. Modeled Spectral Optical Properties For Smoke Aerosols in Amazonia. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 24, p. 2.265–2.270. doi: 10.1029/2003GL018063, 2003.

QUESADA, C. A., PHILLIPS, ET AL., Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, v. 9, p. 2203–2246, doi:10.5194/bg-9-2203-2012, 2012.

RIZZO, L. V., ARTAXO, P., MÜLLER, T., WIEDENSOHLER, A., PAIXÃO, M., CIRINO, G. G., ARANA, A., SWIETLICKI, E., ROLDIN, P., FORS, E. O., WIEDEMANN, K. T., LEAL, L. S. M., e KULMALA, M.: Long term measurements of aerosol optical properties at a primary forest site in Amazonia. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 13, p. 2391-2413, doi:10.5194/acp-13-2391-2013, 2013.

RIZZO, L. V., CORREIA, A. L., ARTAXO, P., PROCÓPIO, A. S., ANDREAE, M. O. Spectral dependence of aerosol light absorption over the Amazon Basin. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 11, p. 8899–8912, doi:10.5194/acp-11-8899-2011, 2011.

SCHAFER, J. S., HOLBEN, B. N., ECK, T. F., YAMASOE, M. A., ARTAXO, P., Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon: Observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scattering albedo of fire aerosols. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8074, doi:10.1029/2001JD000428, 2002.

SCHAFER, J. S., T. F. ECK, B. N. HOLBEN, P. ARTAXO, A. DUARTE., Characterization of the optical properties of atmospheric aerosols in Amazonia from long term AERONET monitoring (1993-1995, 1999-2006). *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, v. 113, n. D4, Article Number: D04204, doi:10.1029/2007JD009319, 2008

SENA, E. T., P. ARTAXO, e A. L. CORREIA. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 1261–1275, doi:10.5194/acp-13-1261-2013, 2013.

SILVA DIAS, M.A.F, S. RUTLEDGE, P. KABAT, P.L. SILVA DIAS, C. NOBRE, G. FISCH, A.J. DOLMAN, E. ZIPSER, M. GARSTANG, A. MANZI, J. D. FUENTES, H. ROCHA, J. MARENGO, A. PLANA-FATTORI, L. SÁ, R. ALVALÁ, M. O. ANDREAE, P. ARTAXO, R. GIELOW, L. V. GATTI. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. *J Geophys Res*, v. 107, n. D20, p. 8072-8092, 2002.

SOARES-FILHO, B. S., NEPSTAD, D. C., CURRAN, L. M., COUTINHO CERQUEIRA, G. GARCIA, R. A., AZEVEDO RAMOS, C., VOLL, E., MCDONALD, A., LEFEBVRE, P., e SCHLESINGER, P.: Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, v. 440, p. 520–523, doi:10.1038/nature04389, 2006.

YAMASOE, M. A., C. VON RANDOW, A. O. MANZI, J. S. SCHAFER, T. F. ECK, B. N. HOLBEN. Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 6, p. 1645-1656, 2006.