

UNIVERSIDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
INSTITUTO DE ESTUDOS TECNOLÓGICOS

Alessandra Lanzoni de Castro

**O TRANSPORTE REGIONAL DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
PROVENIENTES DAS QUEIMADAS NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Juiz de Fora

2005

Alessandra Lanzoni de Castro

**O TRANSPORTE REGIONAL DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
PROVENIENTES DAS QUEIMADAS NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Monografia de conclusão de curso
apresentada ao Curso de Tecnologia em
Meio Ambiente do Instituto de Estudos
Tecnológicos da Universidade
Presidente Antônio Carlos.
Orientadora: Prof^a. Dra. Aline Sarmiento
Procópio

Juiz de Fora
2005

Alessandra Lanzoni de Castro

**O TRANSPORTE REGIONAL DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
PROVENIENTES DAS QUEIMADAS NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Monografia de conclusão de curso apresentada ao Curso de Tecnologia em Meio Ambiente do Instituto de Estudos Tecnológicos da Universidade Presidente Antônio Carlos como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Meio Ambiente e aprovada pela orientadora:



Prof.^a Dra. Aline Sarmiento Procópio

Universidade Presidente Antônio Carlos

Juiz de Fora

2005

Dedico este trabalho aos meus amigos,
familiares e professores, os quais muitos
colaboraram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e familiares por todo apoio.

Aos amigos por compartilharem tantas experiências e cultivar amizades.

Aos mestres, pela paciência e dedicação e amizade no ato de lecionar, em especial a professora Aline Sarmiento Procópio, que se empenhou para que este trabalho pudesse ser concluído.

E a Deus por toda força, fé e coragem para vencer esta jornada.

É preciso amar as pessoas

Como se não houvesse

Amanhã por que se você

parar pra pensar , na

verdade não há

Renato Russo

RESUMO

A detecção, localização e previsão das queimadas são de fundamental importância para o meio ambiente. Diversas atividades naturais e antrópicas alteram as características naturais do meio, dentre elas, as queimadas. As queimadas que ocorrem em áreas tropicais do planeta são fontes importantes de poluentes para a atmosfera, contribuindo de maneira significativa para o acréscimo de gases poluentes e partículas na atmosfera. A utilização de sensoriamento remoto para a detecção e monitoramento de queimadas no Brasil tem-se mostrado uma técnica muito útil. O trabalho de monitoramento operacional de queimadas e incêndios florestais por meio de imagens de satélites é realizado no Brasil pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Os focos de calor obtidos das análises de dados de satélites têm sido excelentes indicadores de onde, quando e com quais frequências as queimadas estão acontecendo na Amazônia. É mostrado neste trabalho como ocorre o transporte de poluentes gerados nas queimadas da Amazônia para a região sudeste do Brasil, indicando que as queimadas podem afetar até mesmo a qualidade da atmosfera urbana.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Detecção de focos de calor monitorado pelos satélites GOES, NOAA e EOS no dia 19/10/2005. -----	15
Figura 2- À esquerda focos de calor detectados pelos sensores VAS/GOES, MODIS/TERRA e AQUA, AVHRR/NOAA durante o ano de 2004. À direita, estimativa para 2004 de emissão de monóxido de carbono (CO) em ton/km ² . -----	19
Figura 3- Focos de calor detectados pelo satélite NOAA-12 nos dias 01/11/2005 e 02/11/2005. -----	20
Figura 4- Focos de calor detectados pelo satélite TERRA/AQUA sensor MODIS, no dia 03/11/2005. -----	23
Figura 5- Ilustração dos principais mecanismos físicos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera. -----	26
Figura 6- Fotografia da cidade do Rio de Janeiro no final da tarde do dia 23/10/2003 -----	27
Figura 7- Simulação numérica do transporte de fumaça emitida por queimadas; a figura descreve o conteúdo de MP _{2,5} integrado na coluna para as 18:00, hora local, do dia 23/10/2003, com valor em torno de 55 mg/m ² sobre a cidade do Rio de Janeiro. -----	28
Figura 8- Simulação numérica do transporte de fumaça emitida por queimadas. Conteúdo de MP _{2,5} integrado na coluna (mg/m ²) às 00Z do dia 27 de agosto de 2002: (a) grade regional do modelo com resolução 40Kmx 40Km; (b) grade de larga escala com resolução de 200Kmx 200 Km. -----	31

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO -----	10
1- Queimadas na Amazônia -----	12
2- O monitoramento de queimadas -----	15
2.1- Detecção de focos de calor por satélite -----	16
2.2- Aplicação da detecção de focos de calor por satélite -----	18
3- O transporte regional de poluentes -----	24
4- O modelamento matemático do transporte de poluentes -----	29
CONCLUSÃO -----	32
BIBLIOGRAFIA -----	34

Introdução

A composição atual da atmosfera terrestre é fruto de processo físicos, químicos e biológicos. Diversas atividades naturais e antrópicas alteram suas características naturais, dentre elas as queimadas. As queimadas ocorrem em muitos países e, em particular, nas regiões tropicais como a Amazônia.

A detecção, localização e previsão das queimadas são de fundamental importância para o meio ambiente. As queimadas que ocorrem na região da Amazônia podem ser transportadas pelo vento que vem do Leste, fazendo uma curva e direcionando-se para o Sul e o Sudeste, afetando a qualidade do ar nestas regiões. Em São Paulo, por exemplo, a qualidade da atmosfera urbana pode ser influenciada pelas queimadas na Amazônia.

Considerando a extensão territorial do país e a relativa falta de condições de controle e fiscalização do fogo, a utilização de um sensoriamento remoto orbital para a detecção e monitoramento de queimadas no Brasil tem se mostrado uma técnica útil. Através de imagens diárias dos satélites meteorológicos da série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), tem sido possível, desde 1987, a detecção de queimadas (focos de calor) em tempo quase real. No Brasil, desde 1995, a obtenção destas imagens tem sido feitas pelos satélites NOAA 12 e 14 (Setzer et al., 1992), sendo que o INPE possui uma estação receptora de imagens.

Do ponto de vista da dinâmica, o conhecimento dos ventos no local de estudo não é suficiente para a determinação da origem das massas de ar, porque o vetor de velocidade em parte é devido a movimento de rotação, e não de translação das massas de ar. É preciso

conhecer a trajetória seguida pelas mesmas e somente através do conhecimento dinâmico da atmosfera é que se pode mapear esses deslocamentos. Assim, uma ferramenta importante para o estudo de transporte dos contaminantes atmosféricos, em diferentes níveis de pressão, tem sido cálculos de trajetória de massas de ar em função do tempo.

Neste trabalho será mostrado um estudo de caso do transporte de poluentes oriundos das queimadas na Amazônia para São Paulo. Para isso, foram usados dados obtidos por satélite (na detecção de focos de incêndio) e dados obtidos através de modelos matemáticos de dispersão atmosférica.

1 Queimadas na Amazônia

As queimadas na Região Amazônica ocorrem predominantemente no período da estação seca, podendo estar relacionadas às mudanças no regime das chuvas no Sul e Sudeste do país. As queimadas podem ocasionar alterações climáticas regionais. Outro efeito negativo é a “exportação da fumaça” para outras regiões no país. Com as queimadas na Amazônia ocorre um aumento da emissão de gases e partículas no ar, que podem ser transportados para outras regiões, causando efeitos como, por exemplo, a diminuição da radiação solar incidente na superfície (Procópio, 2004; <http://www.mre.gov.br/cdbrazil/itamaraty/web/port/meioamb/ecossist/queimada/amazonia>)

De modo geral, os componentes básicos da poluição atmosférica resultante das queimadas são:

- a) Material particulado: Mais de 90% da massa de partículas encontradas na fumaça produzida pela queima de produtos vegetais, como é o caso das queimadas na Amazônia, consiste de partículas finas, justamente a fração de material particulado (MP) que maior prejuízo traz à saúde. Essas partículas medem menos do que 10 micrômetros (milésima parte do milímetro), e são invisíveis a olho nu.
- b) Gases tóxicos: As queimadas lançam na atmosfera gases tóxicos tais como aldeídos, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono. Sob a ação da radiação solar, o monóxido de carbono, na presença de óxidos de nitrogênio e outros produtos orgânicos (hidrocarbonetos), sofre reação química formando ozônio (O₃), que é um gás extremamente tóxico.

As queimadas contribuem de maneira significativa para o acúmulo de gás carbônico na atmosfera, fenômeno apontado como responsável pelo aquecimento da temperatura da Terra, além de acarretarem uma série de prejuízos para o meio ambiente e para a saúde humana.

No planeta existe o que conhecemos como ciclo do carbono, que ocorre da seguinte maneira: seres vivos em decomposição, processos respiratórios e a queima de matéria orgânica liberam carbono na forma de CO_2 , que é reabsorvido pelas plantas por meio da fotossíntese, constituindo assim um ciclo. No entanto as queimadas têm liberado muito mais carbono do que as plantas podem absorver. Essa ação do homem desequilibra o ciclo, pois faz com que haja muito carbono dissolvido na atmosfera, favorecendo o efeito estufa e o aumento da temperatura no planeta (<http://www.ufac.br/linhadireta/linhad475.html>).

A evolução de uma queimada é descrita em quatro estágios: ignição, chamas, brasas e extinção. A ignição da biomassa depende do seu tipo e de sua umidade e de fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa e vento. O estágio de chamas inicia-se com um processo pirolítico, durante o qual as elevadas temperaturas provocam uma ruptura das moléculas constituintes da biomassa. Componentes de alto peso molecular são decompostos em compostos de peso molecular mais baixo, tais como o carvão e o alcatrão, os quais constituem fonte primária de energia para as chamas, e finalmente em compostos de natureza gasosa. A temperatura pode chegar a 1800 K, produzindo carvão e liberando, principalmente, vapor d'água, CO_2 e CO. Com a diminuição das condições necessárias para a manutenção das chamas, a queima entra em um estágio mais 'frio', denominado de fase de brasas. Quando a temperatura no interior da chama está abaixo de 1000 K, reduz-se drasticamente a produção de CO_2 , há uma grande emissão de compostos incompletamente oxidados, como o CO, além de uma rápida formação de partículas. Este estágio é o responsável pela emissão da maior parte do material particulado (Ward *et al.*, 1992).

A extinção pode ser alcançada devido a vários fatores, além da diminuição da quantidade de biomassa disponível. Fatores ambientais causadores seriam, por exemplo, o resfriamento convectivo devido ao entroncamento de ar mais frio, o resfriamento radiativo e o baixo suprimento de oxigênio em relação à densidade e tamanho da biomassa. A evolução seguida pela queima e suas emissões dependem de vários fatores. Um dos mais importantes é o conteúdo de água na biomassa, uma vez que a energia necessária para vaporizar a água líquida é extraída da energia produzida durante a queima. A quantidade de água pode determinar qual fase, de chamas ou de brasas, será mais significativa, definindo, por exemplo, as proporções de CO e CO₂ emitidos. O clima local tem grande relevância na determinação da quantidade de biomassa disponível para a queima. O tempo local, através da temperatura, precipitação e umidade e o vento, determinam condições necessárias para a ocorrência do fogo e seu comportamento, no que refere à razão entre a combustão da fase de chamas para a fase de brasas. A fase de brasas é a que apresenta maior número de diferentes compostos emitidos, enquanto que a fase de chamas apresenta maiores quantidades de material emitido. A principal emissão acontece na forma de CO₂, produzido principalmente na fase de chamas. As emissões deste composto representam em média cerca de 80% a 85% da massa total de carbono queimado, podendo, no entanto, variar de 50% a 99%. A emissão de carbono na forma de CO representa em média 7%, podendo variar entre 2% a 15%. O material particulado é emitido em ambas as fases, sendo sua composição elementar e distribuição de tamanho dependentes do estágio em que foi emitido.

2 O Monitoramento de queimadas

O trabalho de monitoramento operacional de queimadas e incêndios florestais por meio de imagens de satélites é realizado em conjunto pelo INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia) - e pelo Ibama - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Além do monitoramento, o trabalho faz estimativas de risco de fogo da vegetação e do transporte das emissões na atmosfera em todo o território nacional, em particular para a cidade de São Paulo. A figura 1 mostra a detecção de focos de calor acumulados monitorados pelos satélites GOES, NOAA e EOS no dia 19/10/2005.

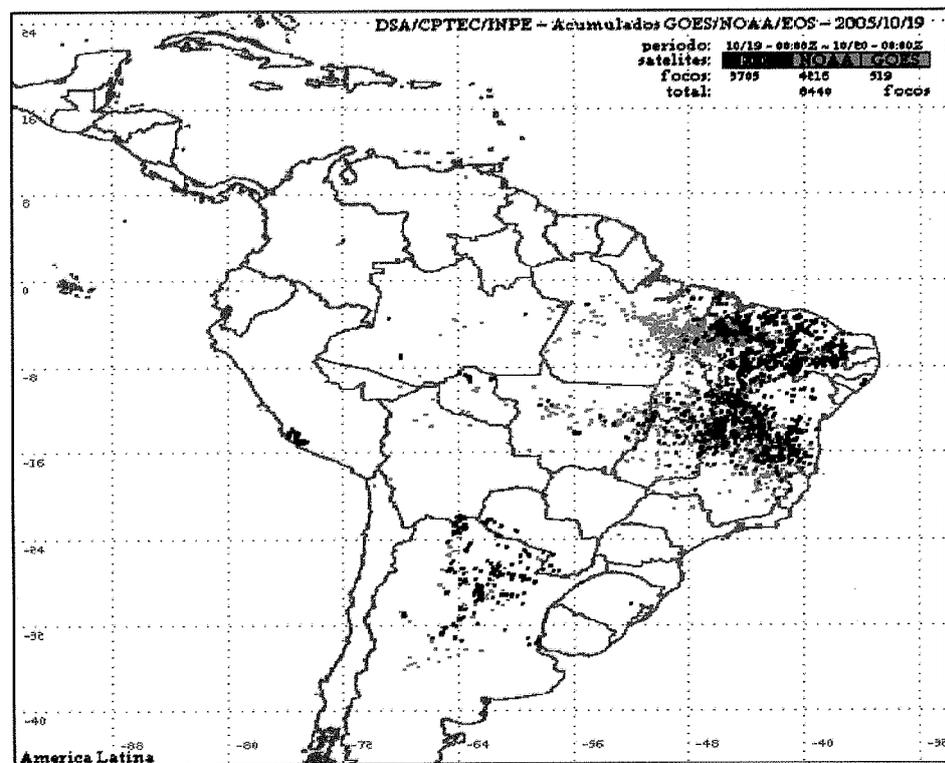


Figura 1- Detecção de focos de calor monitorado pelos satélites GOES, NOAA e EOS no dia 19/10/2005.

Vários boletins diários são enviados por e-mail a usuários cadastrados, já em número superior a 500. Mapas diários de previsão de risco de fogo para quatro dias e mapas semanais para até um mês são gerados pelos modelos de previsão numérica de tempo. Modelos numéricos sofisticados também calculam as trajetórias das emissões das queimadas permitindo prever em quais regiões a poluição atmosférica resultante será intensa. Oito vezes por dia as unidades de conservação federais recebem informação sobre os focos de calor e potenciais incêndios florestais. Todas as técnicas envolvidas neste processo foram desenvolvidas no INPE, incluindo métodos de detecção de focos com satélites, sistemas de informação geográfica, modelos de risco de fogo, etc.

2.1 Detecção de focos de calor por satélite

Os focos de calor oriundos da análise de dados de satélites têm sido excelentes indicadores de onde, quando e com quais frequências relativas as queimadas estão acontecendo na Amazônia. Atualmente, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) está fornecendo informações sobre focos de calor, oferecendo informações de cinco satélites (NOAA-12, NOAA-16, GOES-12, Terra-MODIS, Aqua-MODIS). A análise de focos de calor ainda é um meio importante para ajudar a sociedade a entender mudanças no uso da terra.

A extensão espacial da ocorrência de queimadas em áreas tropicais e subtropicais da América do Sul torna o sensoriamento remoto por satélites a mais viável forma de monitoramento destes eventos. A detecção de focos de queimadas na região de cerrado e floresta tropical no Brasil, usando o radiômetro AVHRR (Advanced Very High Resolution

Radiometer), a bordo da série de satélites NOAA, é realizada de forma operacional no INPE. Resultados de monitoramento de queimadas em áreas de desflorestamento e de cerrado do Brasil também são realizados usando o radiômetro VAS (Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder), a bordo do satélite geoestacionário GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). A sua alta resolução temporal permite um acompanhamento da variabilidade diurna do número e extensão dos focos, além de possibilitar o estudo do movimento e extensão em grande escala da fumaça associada à emissão coletiva de todos os focos de fogo. Mais recentemente, o sensor MODIS (*MODerate – Resolution Imaging Spectroradiometer*) vem sendo utilizado na detecção de focos de incêndio em vegetação. Sensores MODIS encontram-se a bordo dos satélites TERRA e AQUA, lançados em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente, e circulam em torno do globo terrestre 16 vezes ao dia de pólo a pólo, produzindo duas imagens globais diárias.

Atualmente, a detecção de focos de queimadas pelo INPE incorpora produtos derivados a partir das imagens do VAS do satélite GOES e do MODIS dos satélites TERRA e AQUA, cobrindo quase a totalidade da América do Sul. Todas as informações são integradas num sistema de informações geográficas e disponibilizadas na rede Internet em tempo quase real. Este sistema reporta anualmente um número de focos de calor superior a 300.000.

Além da detecção e caracterização dos focos de incêndio, têm-se desenvolvido técnicas de sensoriamento remoto destinadas a observar e quantificar os efeitos dos produtos emitidos. Os produtos de aerossol do MODIS, derivados a partir dos canais 0,47; 0,66; 2,1 e 3,8mm com uma resolução de 10 x 10 km (no nadir), permitem monitorar globalmente a espessura óptica do aerossol atmosférico.

2.2 Aplicação da detecção de focos de calor por satélite

A figura 2 apresenta, à esquerda, a distribuição de focos de calor detectados em 2004 pelos sensores VAS, MODIS e AVHRR (já eliminadas as redundâncias devido as detecções de um mesmo foco por mais de um sensor). A escala de cores determina o número de focos em células de 40 x 40 km². Focos na região noroeste da América do Sul tipicamente ocorrem durante os meses de janeiro a abril, no nordeste a ocorrência se dá principalmente de outubro a janeiro, enquanto que no centro-oeste do Brasil e na borda da região Amazônica ocorrem nos meses de julho a outubro. Observa-se a grande quantidade de queimadas que ocorreram sobre o Mato Grosso (superior a 2000 focos por km²) principalmente associados com a expansão agropecuária. No estado de São Paulo, os focos ocorrem primariamente em áreas de canaviais. No lado direito da mesma figura, aparece a correspondente estimativa de emissão de monóxido de carbono, com valores de acima de 200 ton/km² no Mato Grosso.

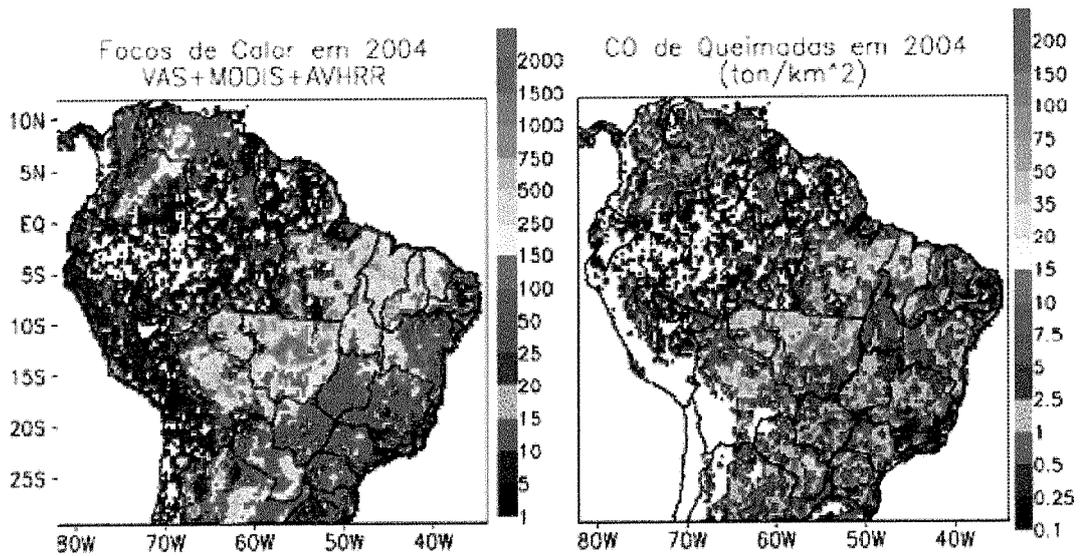


Figura 2- À esquerda, focos de calor detectados pelos sensores VAS/GOES, MODIS/TERRA e AQUA, AVHRR/NOAA durante o ano de 2004. À direita, estimativa para 2004 de emissão de monóxido de carbono (CO) em ton/km².

A Amazônia é a floresta que mais sofre queimadas no mundo. As imagens captadas pelo satélite NOAA-12 (Figura 3) e recebidas pelo INPE mostram que:

- para o dia 01/11/05, na Amazônia, foram detectados diversos focos de calor nos estados de Amazonas, Amapá, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Tocantins;
- houve recobrimento de nuvens nas imagens do satélite NOAA-12 de 01/11/05, e foram detectados focos de calor nos estados de Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima.

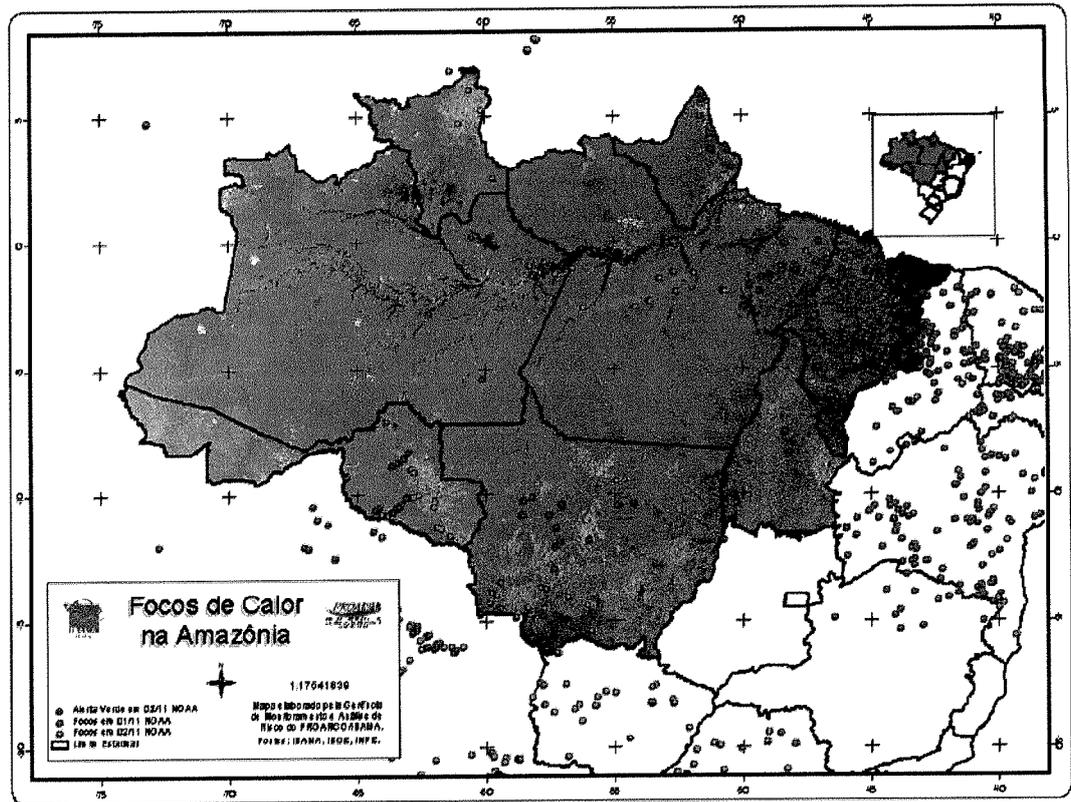


Figura 3 – Focos de calor detectados pelo satélite NOAA-12 nos dias 01/11/2005 e 02/11/2005.

O número total de focos de calor obtidos por estados pelo satélite NOAA 12 no dia 01/11/05, foi:

- Amazonas - 02 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas.
- Amapá - 06 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas, terra indígena e unidade de conservação.

- Maranhão - 351 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas, unidade de conservação e terras indígenas.
- Mato Grosso – 25 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas florestais, desflorestadas.
- Pará – 46 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas.
- Rondônia - 16 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas e unidade de conservação.
- Tocantins – 02 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas.

O número total de focos de calor obtidos nos estados pelo satélite NOAA 12 no dia 02/11/05, foi:

- Amazonas - 11 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas florestais e desflorestadas.
- Maranhão - 22 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas e terra indígena.

- Mato Grosso – 46 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas florestais, desflorestadas.
- Pará – 20 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas e terras indígenas.
- Rondônia - 30 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas, unidade de conservação e terra indígena.
- Roraima - 05 focos de calor. De acordo com verificação feita em mosaico de imagens Landsat/TM, os focos de calor detectados no Estado, ocorreram em áreas desflorestadas e terra indígena.

Em 03 de novembro de 2005 as imagens dos satélites TERRA/AQUA, sensor MODIS, recobriram a Amazônia Legal e foram detectados focos de calor nos Estados de Maranhão e Pará (figura 4).

3 O transporte regional de poluentes

As queimadas que ocorrem em áreas tropicais do planeta, são fontes importantes de poluentes para a atmosfera, durante os meses de inverno, uma área, principalmente de ecossistemas de cerrado e floresta, da ordem de 40 mil km² é queimada anualmente. Estas queimadas ocorrem primariamente nas regiões Amazônica e do Brasil Central, porém, através do transporte atmosférico de suas emissões resulta uma distribuição espacial de fumaça sobre uma extensa área, ao redor de 4-5 milhões de km², em muito superior a área onde estão concentradas as queimadas.

As fontes emissoras associadas às queimadas emitem gases e partículas a temperaturas superiores àquelas da atmosfera do ambiente, tendo assim uma flutuação positiva que transporta estes materiais verticalmente para cima. Um dos fatores determinantes para altura final em que estes materiais são injetados na atmosfera é a estabilidade termodinâmica. Outro fator é a interação entre a fumaça e o ambiente, através de turbilhões que entranham ar ambiente frio para dentro da pluma de fumaça, o que provoca uma diluição desta e reduz a flutuação. Tipicamente, fogos em cerrado e pastagem injetam material dentro da própria camada limite planetária, enquanto que fogos em florestas, com alta densidade de biomassa sendo queimada e uma taxa de calor da ordem 10 GW durante algumas horas, conseguem injetar a fumaça diretamente na baixa e média troposfera (3 a 10 km de altura). A mistura turbulenta da camada limite diurna, também transporta verticalmente estes materiais, tendendo a homogeneizá-los por toda a camada de mistura.

Na direção horizontal, a advecção pelo vento domina o transporte, arrastando os materiais na direção do fluxo da atmosfera. O entranhamento e processos convectivos úmidos atuam para transportar estes materiais para a troposfera, rompendo a estabilidade. Sistemas

convectivos rasos e não-precipitantes ,atuam transportando gases e partículas para a baixa troposfera, e desta forma ajudam na dispersão dos poluentes. Sistemas convectivos profundos e precipitantes atuam de formas distintas dependendo da natureza higroscópica dos traçadores.

Uma vez na troposfera, o transporte destes poluentes se dá de forma mais eficiente devido às velocidades maiores do fluxo de ar, transportando-os para regiões distantes dos locais de emissão, transformando o problema de escala local para continental ou, mesmo, global. Além deste aspecto, processos de remoção de poluentes da atmosfera são mais eficientes, de modo que, uma vez transportados para a alta troposfera, a vida-média destes pode aumentar. Por outro lado, partículas de fumaça podem atuar como núcleos de condensação de água formando gotas de chuva que precipitam, sendo então removidos da atmosfera, processo denominado remoção úmida. Sistemas convectivos induzem também a formação de correntes descendentes que trazem parcelas de ar da média troposfera diluindo e esfriando a atmosfera local. As interações de camadas de ar com a superfície terrestre induzem também a remoção de material, num processo denominado deposição seca. A (figura 5) ilustra os principais mecanismos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera.

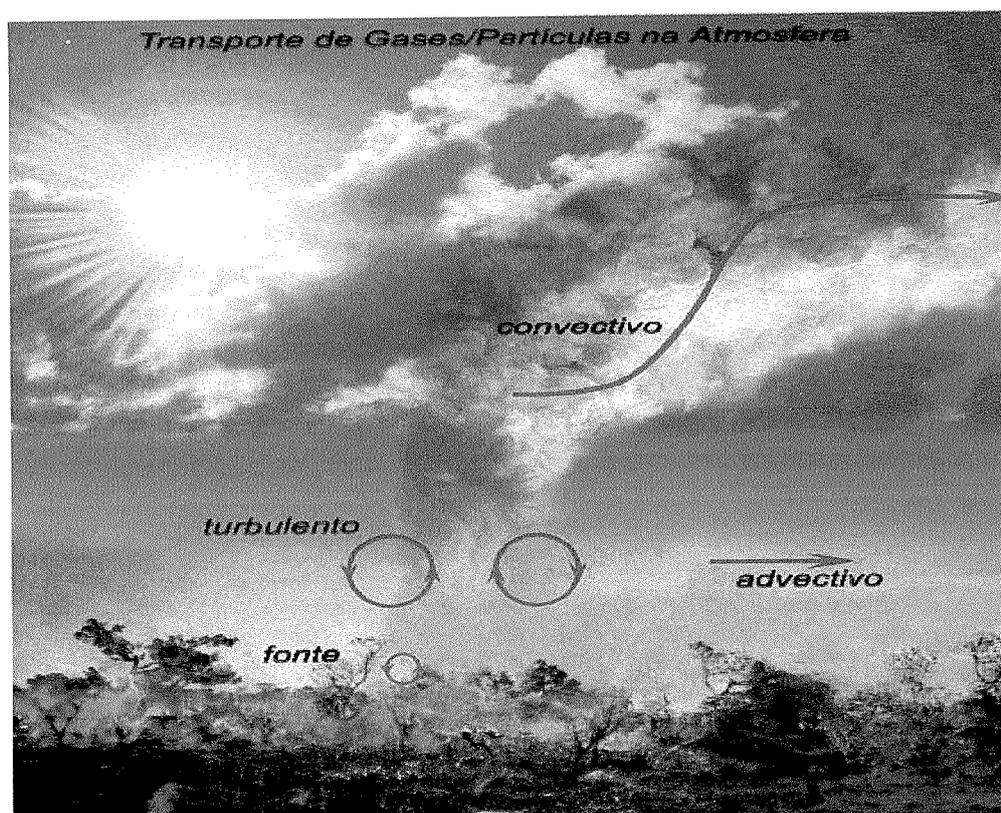


Figura 5- Ilustração dos principais mecanismos físicos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera.

A poluição provocada pelas queimadas na América do Sul atinge regiões distantes dos locais de ocorrência das queimadas e soma-se à poluição antropogênica associada à ocupação urbana e atividades industriais. Como um exemplo do efeito nas grandes cidades, a figura 6 apresenta a fotografia do pôr-do-sol sobre a cidade do Rio de Janeiro no dia 23/10/2003. A inusitada coloração avermelhada esta associada à interação da poluição atmosférica com a radiação solar. A figura 7 apresenta a distribuição de fumaça (material particulado $< 2,5 \mu\text{m}$) simulada numericamente para às 18:00h (hora local). Como resultado de convergência de massas de ar que se formou sobre o sudeste do Brasil (linhas de corrente do fluxo de ar na figura 7), houve uma canalização da fumaça exportada para Oceano Atlântico passando sobre o Rio de Janeiro.

Foto: Fátima Imagem

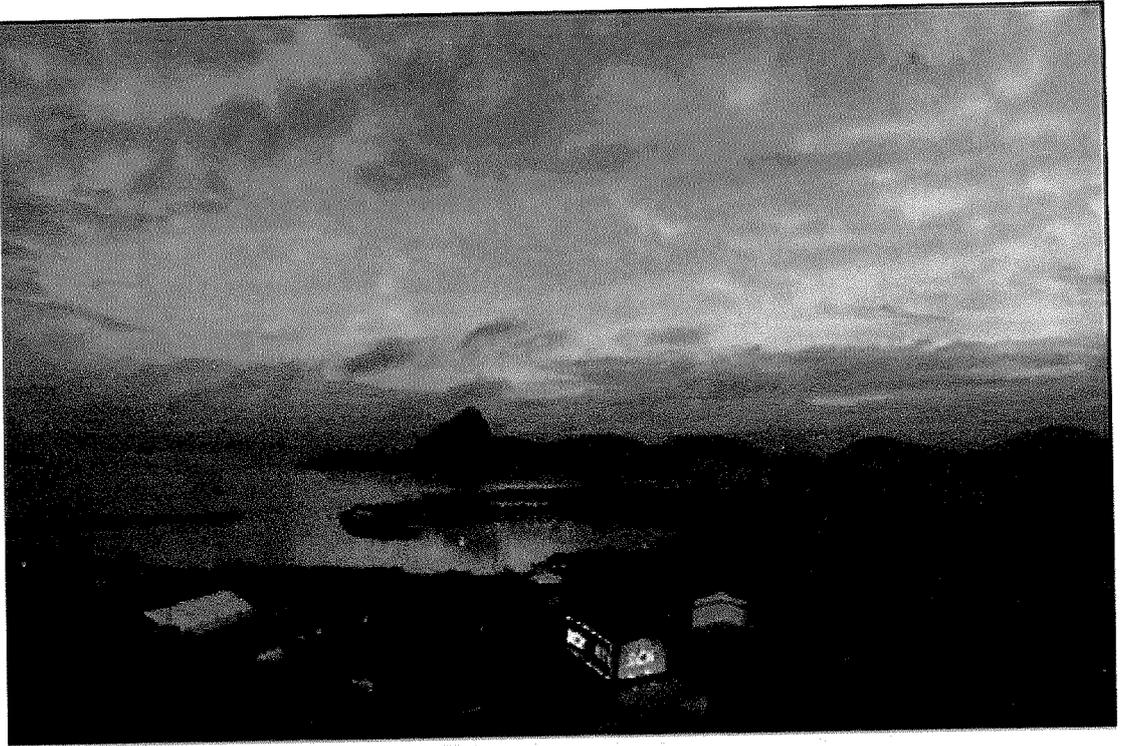


Figura 6- Fotografia da cidade do Rio de Janeiro no final da tarde do dia 23/10/2003.

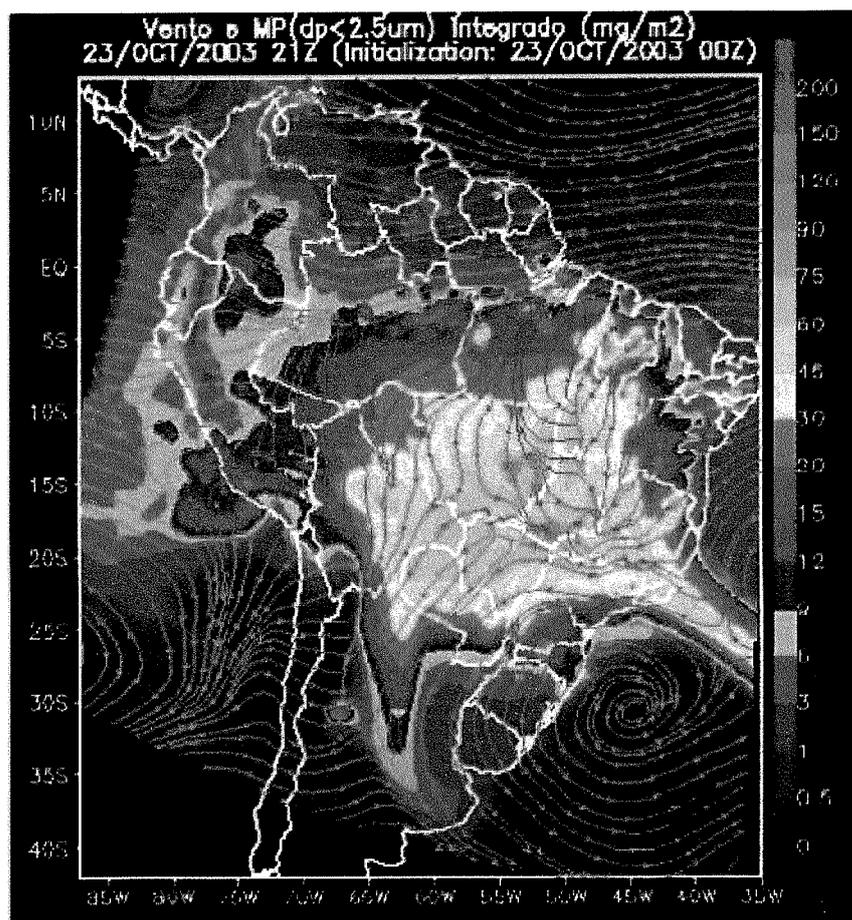


Figura 7- Simulação numérica do transporte de fumaça emitida por queimadas; a figura descreve o conteúdo de $MP_{2.5}$ integrado na coluna para as 18:00, hora local, do dia 23/10/2003, com valor em torno de 55 mg/m^2 sobre a cidade do Rio de Janeiro.

4 O modelamento matemático do transporte de poluentes

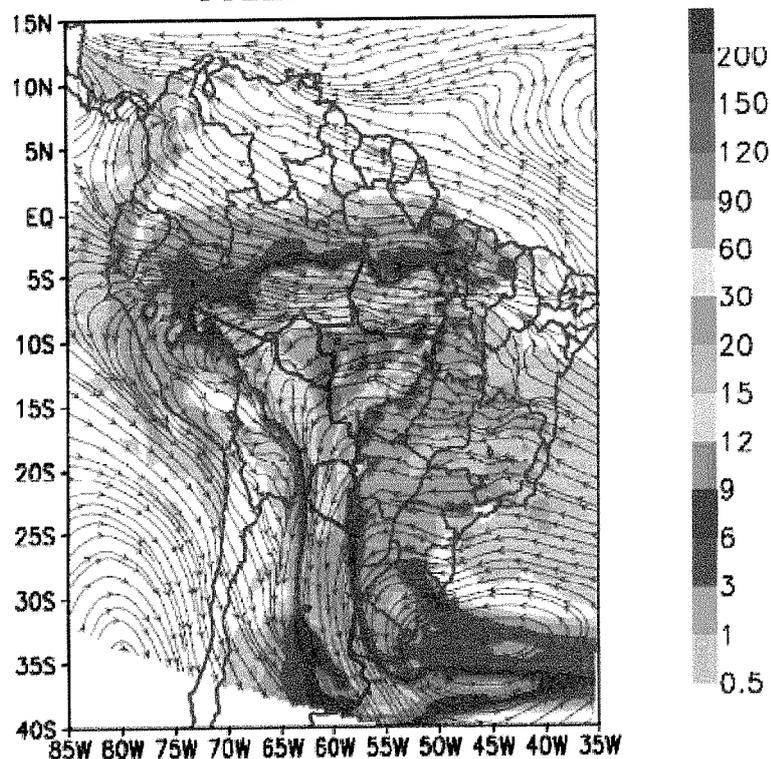
Os modelos matemáticos permitem simular a estrutura e o funcionamento dos sistemas ambientais, pela consideração de todas as relações biofísicas e antrópicas possíveis de serem compreendidas no fenômeno estudado. Uma metodologia de cálculo foi apresentada por Longo *et al.* (2004) para o estudo do transporte de gases traços e partículas de aerossóis emitidos por queimadas. A metodologia é baseada no acoplamento do modelo de transporte ao modelo atmosférico RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), um código numérico desenvolvido na Universidade do Estado do Colorado (EUA) para produzir simulações diagnósticas e prognósticas do estado atmosférico. Os principais processos de transporte e remoção de traçadores são parametrizados e a simulação do transporte é realizada simultaneamente com a evolução do estado atmosférico. Como um resultado desta metodologia, Freitas (1999) desenvolveram um sistema de monitoramento do transporte de emissões de queimadas em tempo real, o qual foi implementado operacionalmente gerando previsões de concentração de CO e MP para a América do Sul e parte da África. A figura 8 apresenta um resultado desta metodologia, a simulação numérica do conteúdo de MP_{2.5} na coluna atmosférica (mg/m²) é a mostrada em duas resoluções espaciais: (a) 40 km, (b) 200 km.

Nesta figura aparecem também as linhas de corrente do fluxo de ar na baixa troposfera. Na região nordeste do Brasil, os ventos de leste na baixa troposfera trazem massas de ar não poluídas vindas do oceano, que diluem e transportam as emissões de queimadas para oeste. Com a barreira topográfica dos Andes, a maior parte do fluxo de ar é desviada para o sul e sudoeste, transportando a fumaça sobre a Bolívia, Paraguai e Argentina, saindo do continente em direção ao oceano Atlântico na parte mais ao sul e sudeste de América do Sul. Com a entrada de frentes frias vindo do sudoeste e sul do continente, a fumaça é empurrada

novamente para o norte e nordeste, e, em muitas vezes, parte da exportação para o oceano Atlântico se dá na região sul e sudeste do Brasil, passando sobre as regiões mais populosas, com os valores máximos de concentração ocorrendo a uma altura em torno de 2 km.

Este sistema produz um enorme fluxo de massa da região Amazônica para o sul da América do Sul, transportando não só fumaça, mas também vapor d'água e favorecendo a formação de grandes tempestades, os chamados complexos convectivos de mesoescala, sobre o norte da Argentina e sobre o Paraguai, com conseqüente deposição úmida de material transportado da região de queimadas.

(a) Material Particulado (mg/m^2) - 40km
00Z27AUG2002



(b) Grade de 200km 00Z27AUG2002

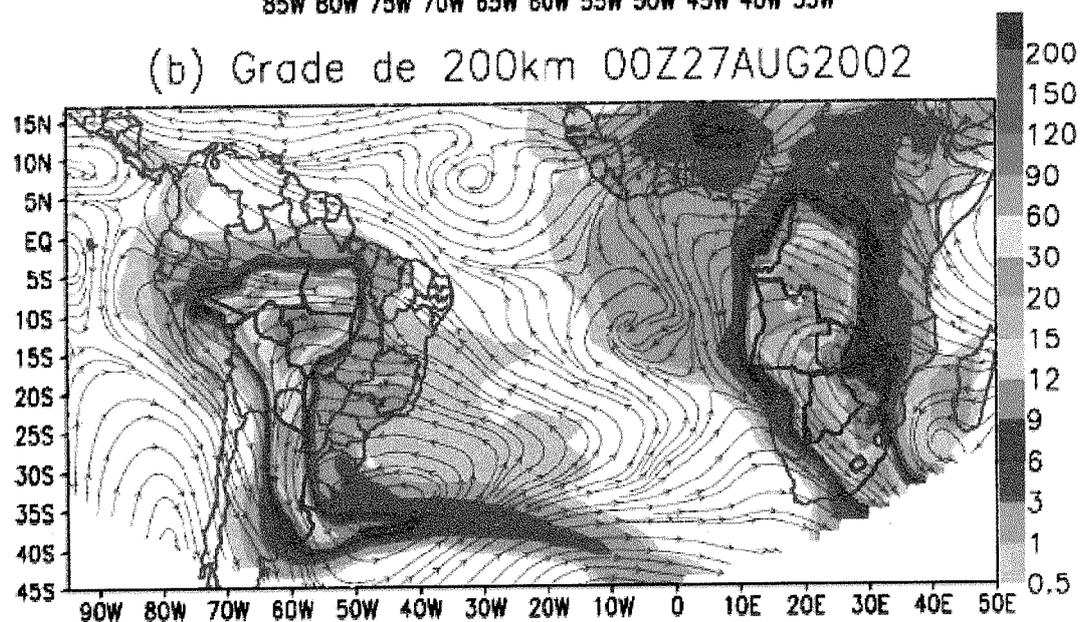


Figura 8- Simulação numérica do transporte de fumaça emitida por queimadas. Conteúdo de $\text{MP}_{2.5}$ integrado na coluna (mg/m^2) às 00 Z do dia 27 de agosto de 2002: (a) grade regional do modelo com resolução 40 km x 40 km; (b) grade de larga escala com resolução de 200 km x 200 km.

Conclusão

O controle de queimadas e emissão de gases e material particulado por satélite é de fundamental importância para o meio ambiente, ajudando no controle e fiscalização do fogo e estimando o risco de fogo da vegetação, além de permitir a previsão do transporte de poluentes na atmosfera em todo o Brasil. A utilização de sensoriamento remoto, com imagens diárias dos satélites para a detecção de queimadas (focos de calor) em tempo quase real, é de suma importância para o controle de queimadas e diminuição dos possíveis impactos ambientais.

As queimadas na Amazônia são distribuídas principalmente na região do arco do desflorestamento, mas incêndios também são observados em outras áreas próximas às rodovias e regiões habitadas. Dependendo da circulação regional e da quantidade e intensidade das queimadas, a pluma originada na Amazônia pode cobrir uma área de 2 a 6 milhões de km², correspondente a quase a metade do continente Sul-americano. Em geral, na baixa troposfera, os ventos provenientes do Oceano Atlântico alcançam o oeste da Amazônia, onde são bloqueados pela topografia alta e íngreme dos Andes da Bolívia e do Peru, mudando gradualmente sua direção, seguindo para a região central da América do Sul. Como consequência, as emissões das queimadas da Região Amazônica podem ser transportadas, atingindo outras regiões do Brasil. Adicionalmente, essas emissões também podem ser transportadas para a alta troposfera por meio de fortes movimentos convectivos que ocorrem na região Amazônica, podendo atingir escalas maiores e afetar até mesmo outros países da América do Sul

É importante ressaltar que as queimadas ocorrem numa escala espacial muito maior que a América do Sul, sendo freqüente em outras regiões do planeta, principalmente nos continentes Africano e Asiático que também apresentam um ciclo anual de queima, emitindo

grandes quantidades de poluentes para a atmosfera. Assim, as queimadas têm um impacto relevante no processo de mudanças climáticas em escala planetária. O entendimento e avaliação deste impacto passam, necessariamente, pela junção de estudos observacionais e modelagem numérica gerando modelos complexos que descrevem as inter-relações biosfera-atmosfera, caracterizando um estudo multidisciplinar.

Bibliografia

Braga, B. et al., *Introdução a Engenharia Ambiental*, Editora Prentice Hall, 2002.

Coutinho, L.M., H.S.Miranda e H.C. de Moraes. O Bioma do Cerrado e o Fogo. *Revista do Instituto de Estudos Avançados da USP*, 50 pp., 2002.

EMBRAPA, *Programas e Projetos Especiais- Monitoramento Orbital de Queimadas- Recomendações Tecnológicas*, Distrito Federal, 2003.

Freitas, S. R. *Modelagem Numérica do Transporte e das Emissões de Gases Traços e Aerossóis de Queimadas no Cerrado e Floresta Tropical da América do Sul*. Tese de Doutorado em Física Aplicada - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, agosto de 1999.

Longo K., S. Freitas, M. Silva Dias, R. Chatfield, P. Silva Dias. Numerical modelling of the biomass burning aerosol direct radiative effects on the thermodynamics structure of the atmosphere and convective precipitation. *8th International Global Atmospheric Chemistry Conference*, Nova Zelândia, 2004.

PROARCO/IBAMA, *Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal*, 2003.

Procopio, A.S., Artaxo, P., Kaufman, Y., Remer, L., Schafer, J.S., Multiyear Analysis of Amazonian Biomass Burning Smoke Radiative Forcing of Climate. *Geophysical Research Letters*, 31, doi:10.1029/2003GL018646, 2004.

Setzer, A. W., Pereira, M. C. & Pereira A. C., O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil. *Climanálise*: 7(8): 41-53, 1992.

Ward, D.E. *et al.*, Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil:

BASE-B experiment. *Journal of Geophysical Research*, 97, 14601-14619, 1992.

INPE, http://www.cptec.inpe.br/meio_ambiente/index.shtml, acessado em 12/11/2005.

INPE, <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>, acessado em 25/11/2005.

INPE, <http://www.cptec.inpe.br/queimadas/queimaestado.html>, acessado em 15/10/2005.

Ministério das Relações Exteriores,
<http://www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/web/port/meioamb/ecossist/queimada/amazonia>, acessado em 25/10/2005.

UFAC, <http://www.ufac.br/linhadireta/linhad475.html>, acessado em 18/10/2005.

NOAA, http://wesley.wwb.noaa.gov//ncep_data/index.html, acessado em 25/11/2005.