

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8433-TDI/775

**AVALIAÇÃO DE CONTAMINANTES PRODUZIDOS EM LOCAIS
DE QUEIMADAS E TRANSPORTADOS PARA REGIÕES ONDE
NÃO SE QUEIMA**

Cláudia Boian Aires

Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Volker Walter Johann
Heinrich Kirchhoff, aprovada em 02 de março de 2001.

INPE
São José dos Campos
2001

504.3.054

AIRES, C. B.

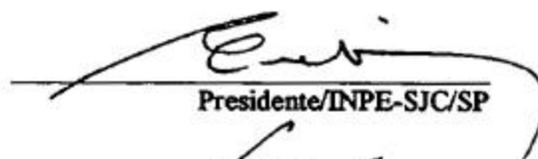
Avaliação de contaminantes produzidos em locais de queimadas e transportados para regiões onde não se queima / C. B. Aires – São José dos Campos: INPE, 2001.

116p. – (INPE-8433-TDI/775).

1.Queimadas. 2.Monóxido de carbono. 3.Dióxido de carbono. 4.Ozônio. 5.Transportes de contaminantes. I. Título.

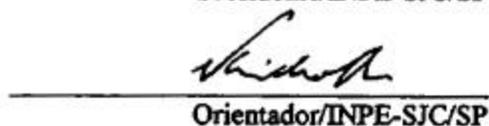
Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Doutor** em **Geofísica Espacial**.

Dr. Enio Bueno Pereira



Presidente/INPE-SJC/SP

Dr. Volker Walter J. Heinrich Kirchhoff



Orientador/INPE-SJC/SP

Dr. Plínio Carlos Alvalá



Membro da Banca/INPE-SJC/SP

Dr. Delano Gobbi



Membro da Banca/INPE-SJC/SP

Dr. Ivan Jelinek Kantor



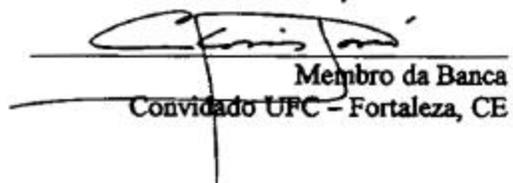
Membro da Banca/INPE-SJC/SP

Dr. Valter Casseti



Membro da Banca
Convidado FUNAPE - Goiânia, GO

Dr. Clóvis José



Membro da Banca
Convidado UFC - Fortaleza, CE

Candidato (a) : Cláudia Boian Aires

São José dos Campos, 02 de março de 2001.

Dedico este trabalho a meus pais, Augusto e Tercília, que com amor e responsabilidade ensinaram - me a trilhar os primeiros passos e a meu marido, Gianni, pela compreensão, companheirismo e carinho sempre demonstrados.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Dr. Volker W. J. H. Kirchhoff, pela orientação deste trabalho, auxiliando e colaborando sempre para o seu bom desenvolvimento e conclusão.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

À Fundação Universidade do Tocantins (UNITINS).

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em especial, ao Laboratório de Ozônio do INPE de São José dos Campos (SP).

À Divisão de Satélites Ambientais do INPE (DAS), em especial aos Srs. Sérgio Pereira e Ricardo Alex Braga pela constante colaboração.

Ao Dr. Igor Troniskov por sua paciência e dedicação na transmissão de seu amplo conhecimento na área de cálculo de trajetórias de massas de ar.

Aos docentes e pesquisadores do Curso de Pós Graduação em Geofísica Espacial do INPE.

Ao piloto Pedro Celso e ao co-piloto Roberval do avião Bandeirante do INPE pelo suporte dado durante as campanhas.

Aos técnicos Angélica, Domingos, Luís Manguiera, Roberto Chagas e ao engenheiro Marcelo do Laboratório de Ozônio do INPE de São José dos Campos (SP), pelo apoio durante a fase experimental desse trabalho.

A todos os colegas e funcionários que direta ou indiretamente auxiliaram na realização desse trabalho.

RESUMO

O Brasil apresenta um grande contraste entre regiões fonte de queimada (Brasil Central) e não fonte de queimada (como por exemplo, a região sul). Cálculos de trajetórias de massas de ar na troposfera (0 a 4 km) evidenciam a existência de um corredor de circulação de massas de ar entre regiões fonte de queimada e não fonte, no continente brasileiro. Objetivamos com esse trabalho realizar medidas de gases traço de queimada ao longo desse “corredor de circulação de massas de ar” e quantificar em termos de concentrações de monóxido de carbono CO, a influência das queimadas realizadas no Brasil Central (área de domínio do bioma cerrado) sobre regiões de baixos índices de queima de biomassa. Foram realizadas duas campanhas aéreas com o avião Bandeirante do INPE nos anos de 1999 e 2000, onde foram feitas medidas de monóxido de carbono, ozônio e dióxido de carbono. A área coberta incluiu regiões de intensa queima de biomassa e regiões de não queima. Um grande gradiente de concentrações de CO foi observado. A fim de quantificar a influência das queimadas realizadas no Brasil Central sobre as regiões de baixos índices de queima de biomassa desenvolvemos um modelo para estimar o termo de transporte. A metodologia desenvolvida para a determinação do termo de transporte/célula mostrou-se eficiente, sendo possível a identificação de percentuais elevados de CO (máximo de 25% na primeira campanha e de 9.7% na segunda) devido ao transporte nas regiões não fonte de queimada e percentuais de até 58% nas regiões vizinhas às grandes fontes de queimada.

TRANSPORT OF TRACE GASES FROM BIOMASS BURNING SOURCE REGIONS TO OTHER REGIONS

ABSTRACT

Biomass burning is a well known phenomenon in Brazil. It is a seasonal event, and it is distributed uniformly over the country. On the contrary, there is a distinct contrast between intense burning areas and regions where there is little or no burning, as in the south of Brazil. In terms of air mass transport, there is a circulation pattern in the form of a stream line tube that can connect the burning areas to regions of no burning activity, by transporting the gases and aerosols produced in the burnings produced elsewhere. The objective of this work is to perform measurements of trace gases produced in the fires, and transported by the special circulation mentioned, to regions south of the burning areas. The idea is to quantify the amount of carbon monoxide at the site and estimate how much has arrived by transport. Two field campaigns were made, in 1999 and 2000, using the INPE Bandeirante instrumented aircraft, used for the sampling of the trace gases. Ozone, carbon dioxide and carbon monoxide were measured. The area covered included intense burning and no burning regions. A large concentration gradient in CO was observed. In order to quantify the influence of the burning areas in Central Brazil over regions with low burning indices, a numerical model was developed in order to extract the transport contribution from the measurements. Large contributions in the local CO concentration that were transported to the sites (instead of local production: 25% for the first campaign, and 9.7% in the second) and much larger values of up to 58% for the regions next to the burning source areas were determined.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	21
1.1 - Objetivo Geral.....	21
1.2 - Objetivos Específicos	21
1.3 - Estrutura da Tese.....	22
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	23
2.1 - Fotoquímica da Troposfera	25
2.1.1 - Monóxido de Carbono e Oxidrila OH.....	26
2.1.2 – Ozônio	30
2.1.3 - Dióxido de Carbono	33
2.2 - Caracterização e Descrição da Área de Estudo	37
2.2.1 - Meteorologia da Área de Estudo.....	44
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	47
3.1 - Cromatografia Gasosa	47

3.2 - Fotômetro O ₃ – UV	50
3.3 - Analisador de CO ₂	53
3.4 - O Uso do Avião do INPE para Medidas de Gases Traço	55
3.5 - Detecção de Queimadas pelo Sistema Imageador AVHRR/NOAA	58
3.6 - Cálculos de Trajetórias de Massas de Ar	60
3.6.1 - Fundamentos do Cálculo de Trajetórias de Massas de Ar.....	61
3.6.2 - Método Utilizado para o Cálculo de Trajetórias “Forward” e “Backward”	66
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 - Medidas Aéreas de Monóxido de Carbono	69
4.1.1 - Campanha de setembro/1999	69
4.1.2 - Campanha de setembro/2000	73
4.2 - Outros Gases Medidos	77
4.3 - Modelo para o Cálculo do Termo de Transporte	79
4.3.1 - Validação Numérica da Metodologia Desenvolvida para o Cálculo do Termo de Transporte	84
4.3.2 - Cálculo do Termo de Transporte para os Dados da Campanha de setembro/1999	87
4.3.3 - Cálculo do Termo de Transporte para os Dados da Campanha de setembro/2000.....	91
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	95

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS97

APÊNDICE A – Medidas Aéreas de O₃ e CO₂ ao Longo do “Corredor
de Circulação de Massas de Ar” 109

APÊNDICE B - Modelo Para o Cálculo do Termo de Transporte.....115

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Mapa do Brasil mostrando a região do bioma cerrado.....	24
2.2a - Concentrações de O ₃ médias, máximas e mínimas em experimentos realizados nas estações seca e chuvosa, TRACE A, 1992.....	32
2.2b - Concentrações de CO médias, máximas e mínimas em experimentos realizados nas estações seca e chuvosa, TRACE A, 1992.....	33
2.3 - Os reservatórios de carbono na terra, na biosfera, nos oceanos atmosfera e as trocas anuais de dióxido de carbono (expresso em termos massa de carbono) entre os diferentes reservatórios. As unidades estão expressas em 1000 milhão de toneladas ou gigatons (Gt).....	34
2.4 - Distribuição dos focos de queimada/mês e por região brasileira no ano de 1998. (A mesma escala é usada para efeito de comparação).....	38
2.5 - Distribuição dos focos de queimada/mês e por região brasileira no ano de 1999. (A mesma escala é usada para efeito de comparação).....	39
2.6 - Contribuição percentual em focos de queimada/região brasileira no ano de 1998.....	40
2.7 - Contribuição percentual em focos de queimada/região brasileira no ano de 1999.....	41
2.8 - Trajetórias “forward” para o período de nove dias (24/07 a 01/08/98) em superfícies isentrópicas com temperaturas potenciais de 307,5	

K; 308,0 K; 308,5 K e 309,0 K centralizando a região do “corredor de circulação de massas de ar”. 1. Salvador – BA (12 ^o S, 38 ^o W); 2. Palmas - TO (10 ^o S, 48 ^o W), 3. Cuiabá - MT (16 ^o S, 54 ^o W); 4. Campo Grande - MS (20 ^o S, 54 ^o W); 5. Curitiba - PR (25 ^o S, 49 ^o W); 6. Natal RN (6 ^o S, 35 ^o W).....	43
2.9 - Principais sistemas que afetam a circulação da troposfera, no Brasil durante o inverno: 1) Anticiclone do Atlântico Sul - SASH, 2) Zona de Convergência Intertropical - ITCZ, 3) Região de subsidência de larga escala (Brasil Central) e 4) Sistemas Transientes Frontais – FSs.....	45
2.10 - Distribuição típica do vetor vento médio (m.s ⁻¹) para julho em 850 hPa.....	46
3.1 - Diagrama esquemático do cromatógrafo.....	47
3.2 – Sistema de amostragem de gases para posterior análise cromatográfica.....	48
3.3 - Cromatógrafo do Laboratório de Ozônio do INPE de São José dos Campos (SP).....	50
3.4 - Diagrama do fotômetro de O ₃ – UV.....	52
3.5 - Esquema do analisador de CO ₂	54
3.6 - Vista lateral do avião Bandeirante do INPE.....	56
3.7 – Vista interna do avião Bandeirante do INPE e do rack instrumentalizado, instalado na aeronave.....	57
3.8 - Entrada de ar externa à aeronave.....	58
3.9 - Mapa do Brasil com a distribuição espacial dos focos de queimada para o mês de setembro de 1999.....	60

3.10 - Distribuição de pressão (linhas de isovalores) e ventos (vetores) para a temperatura potencial de 307,5 K, em 20/07/98.....	65
3.11 - Esquema da rotina para o cálculo de trajetórias para o modelo isentrópico adotado.....	68
4.1 - Trajeto de ida ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações de CO medidas. Vôo com avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999.....	71
4.2 - Trajeto de volta ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações de CO medidas. Vôo com avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999.....	72
4.3 - Trajeto ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações de CO medidas. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 01 a 07/09/2000.....	75
4.4 - Focos de queimada registrados pelo satélite NOAA 12 no período de 01 a 07/09/2000.....	76
4.5 - Mapa do Brasil com a subdivisão da área do “corredor de circulação de massas de ar” em células de $5^0 \times 5^0$, designadas pelas letras de A até N.....	80
4.6 - Diagrama esquemático da variação temporal da contribuição regional (Cr) e definição dos termos Cm, Cb e Ct.....	83
4.7 - Comparativo entre os termos de transporte para diferentes parâmetros de entrada considerando os focos mensal de queimada/célula do mês de setembro e Cb = 100, 80 e 60 ppbv, respectivamente.....	86

4.8 – Cálculo do termo de transporte para os dados da campanha de setembro/1999.....	88
4.9 - Cálculo do termo de transporte para N = média julho, agosto e setembro/1999.....	90
4.10 - Cálculo do termo de transporte/célula para os dados da campanha de setembro/2000.....	92
A1 - Trajeto de ida ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de O ₃ /trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999. As siglas correspondem às cidades de: CR = Curitiba (PR); UM = Umuarama (PR); PP = Ponta Porã ; CG = Campo Grande (MS); CB = Cuiabá (MT); PN = Porto Nacional (TO) e BA = Barreiras (BA).....	110
A2 - Trajeto de volta ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de O ₃ /trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999. As siglas correspondem às cidades de: BA = Barreiras (BA); PN = Porto Nacional (TO); CB = Cuiabá (MT); PP = Ponta Porã e CR = Curitiba (PR).....	111
A3 - Trajeto ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de O ₃ /trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 01 a 07/09/2000.....	112
A4 - Trajeto ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de CO ₂ /trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 01 a 07/09/2000.....	113

LISTA DE TABELAS

Pág.

2.1 - Principais processos de emissão (fontes) e remoção (sumidouros) de monóxido de carbono (CO) da atmosfera.....	29
---	----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo Geral

Sabe-se que no Brasil há regiões onde ocorre muita queima de biomassa (Brasil Central), e regiões onde quase não há queimadas (região sul, por exemplo). No entanto, nestas regiões de pouca queima medem-se, às vezes, concentrações elevadas de gases traço gerados por queimadas. Em outras palavras, as regiões de muita queima, ou **regiões fonte**, exportam gases gerados em queimadas para **regiões não fonte**. Cálculos de trajetórias de massas de ar evidenciam a existência de um “corredor de circulação de massas de ar”, para alturas entre cerca de 0 a 4 km, entre regiões fonte e não fonte de queimada no continente brasileiro. Objetivamos nesse trabalho realizar medidas de gases traço ao longo desse “corredor de circulação de massas de ar” e quantificar em termos de concentrações de monóxido de carbono, CO, a influência das queimadas realizadas no bioma cerrado (Brasil Central), sobre regiões de baixos índices de queima de biomassa.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar cálculos de trajetórias para determinar o caminho de transporte continental de massas de ar na troposfera, em altitudes definidas;
- b) Utilizar os dados dos satélites da série NOAA para avaliar a distribuição espacial e temporal dos focos de queimada;
- c) Realizar medidas aéreas de monóxido de carbono ao longo da área de estudo (“corredor de circulação de massas de ar” no Brasil) a fim de estudar o transporte de contaminantes de áreas fonte para não fonte de queimada;

- d) Desenvolver uma metodologia para estimar o termo de transporte de monóxido de carbono (ao longo do “corredor de circulação de massas de ar”) de regiões fonte de queimada para não fonte, com base nas medidas aéreas de monóxido de carbono e dos dados de focos de queimada dos satélites da série NOAA.
- e) Determinar as concentrações de monóxido de carbono, provenientes de áreas fonte de queimada, que são transportadas para áreas não fonte.

1.3 Estrutura da Tese

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão dos conceitos importantes para esse estudo (fundamentos teóricos) e também se faz uma descrição da área de estudo; no capítulo 3 realiza-se uma explanação da metodologia e dos equipamentos utilizados nesse trabalho; no capítulo 4 discute-se os resultados obtidos nas duas campanhas realizadas com avião Bandeirante do INPE (setembro/1999 e setembro/2000), o modelo desenvolvido para o cálculo do termo de transporte de monóxido de carbono entre regiões fonte e não fonte de queimada e no capítulo 5 apresenta-se as conclusões finais. Nos apêndices A e B apresenta-se, respectivamente:

- A) Os gráficos com os resultados das medidas aéreas de ozônio (campanha de setembro/1999); de ozônio e dióxido de carbono (campanha de setembro/2000);
- B) O programa desenvolvido para o cálculo do termo de transporte de monóxido de carbono de regiões fonte para não fonte de queimada.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A queima de biomassa é uma prática comum, especialmente em regiões tropicais, como por exemplo: o Brasil, a Ásia, a África e a América do Sul. Com o objetivo de aumentar a produtividade agropecuária, o homem vem utilizando o fogo como instrumento de manejo de maneira empírica, em geral sem controle o que provoca a queima excessiva de grandes áreas. No Brasil grande parte das queimadas ocorre no bioma cerrado, que possui uma área de cerca de $1,8 \times 10^6$ km², compreendendo principalmente os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Caracteriza-se, também, por apresentar uma enorme diversidade biológica, grande potencial em plantas medicinais, espécies forrageiras nativas e árvores frutíferas (Coutinho, 1990). A Figura 1 apresentada a seguir, ilustra a área ocupada pelo bioma cerrado, no Brasil.

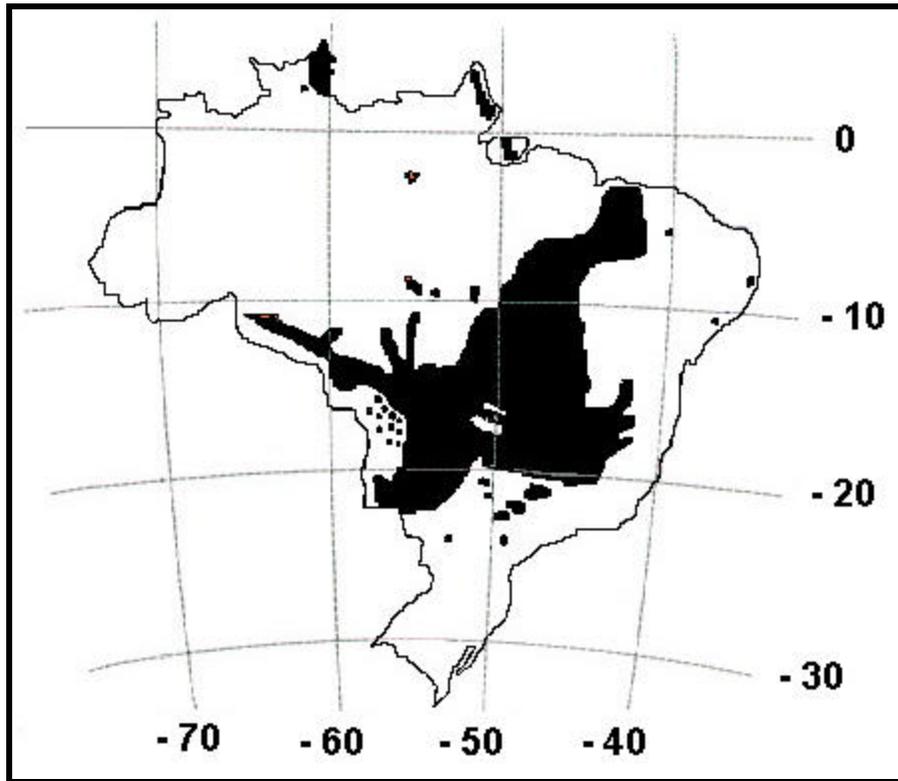


Fig. 2.1 – Mapa do Brasil mostrando a região do bioma cerrado.

FONTE: Coutinho (1990, p.84).

O complexo fisionômico representado pelo cerrado, apresenta uma vegetação típica, caracterizada por árvores de pequeno porte e galhos retorcidos dispersas em meio a gramíneas. Devido às suas características fisionômicas a vegetação do cerrado, em geral, é resistente às queimadas realizadas no período de seca e torna a brotar no período das chuvas, fazendo com que no próximo período de seca torne-se a queimar de novo. Este fato aliado às condições meteorológicas que definem períodos de grande estiagem (cerca de seis meses), fazem com que as queimadas realizadas na região do cerrado, sejam um evento fortemente sazonal e cíclico.

Se por um lado a queima de biomassa representa para o agricultor e/ou pecuarista uma forma de aumento da produtividade agropecuária, através da abertura rápida de áreas para pastagem e plantio, por outro lado gera muitos impactos negativos para o meio ambiente. Dentre os vários problemas causados pelas queimadas, tais como: empobrecimento do solo, destruição da vegetação primária relacionada a problemas de erosão, efeitos na biodiversidade, temos o problema da poluição atmosférica, que afeta a química da troposfera (a troposfera é a camada mais baixa da atmosfera entre a superfície e cerca de 16 km de altura, na região tropical), através da formação e injeção de gases tóxicos e materiais particulados, representado pelos aerossóis (Kirchhoff, 1992; Pereira et al. 1996; Artaxo et al., 1998).

Através de estudos experimentais, Crutzen et al. (1979), mostraram que no processo de queima de biomassa, ocorre a liberação de vários gases traço como: dióxido de carbono - CO_2 , monóxido de carbono - CO , metano - CH_4 , óxido nítrico - NO , óxido nítrico - NO_2 , óxido nítrico - NO_x (NO , NO_2) e outros hidrocarbonetos bem como materiais particulados, na forma de aerossóis (Crutzen e Andreae, 1990, Crutzen et al., 1985).

2.1 Fotoquímica da Troposfera

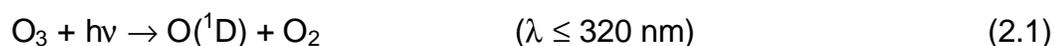
Gases como o monóxido de carbono, o ozônio e a oxidrila OH desempenham um papel importante na fotoquímica da troposfera. A oxidrila OH consiste num efetivo “limpador” da atmosfera, pois vários produtos das reações com o OH são solúveis na água, o que implica na sua remoção da atmosfera com a ocorrência das chuvas (Kirchhoff e Marinho, 1988). O monóxido de carbono por sua vez representa um precursor do ozônio e ambos em concentrações elevadas são bons indicadores de uma atmosfera poluída (Kirchhoff e Rasmussen, 1990). Outro contaminante resultante de atividades antrópicas é o dióxido de carbono que também é um dos gases do efeito estufa (Pavão, 1994).

2.1.1 Monóxido de Carbono e Oxidrila OH

O monóxido de carbono (CO) é um constituinte natural da atmosfera, que tem uma importância muito grande na fotoquímica da atmosfera em geral (Logan et al, 1981; Kirchhoff, 1984), e em particular na química do ozônio (Fishman e Seiler, 1983). Além disso, pode também influir indiretamente na oxidação de vários outros compostos químicos naturais ou artificiais da atmosfera, pois reage diretamente com um dos mais poderosos oxidantes da atmosfera, a oxidrila, OH.

O monóxido de carbono também pode ser introduzido artificialmente na atmosfera pela ação antrópica, através da queima de combustíveis fósseis em ambientes urbanos e da queima de biomassa nos meios rurais (Kirchhoff e Marinho, 1988).

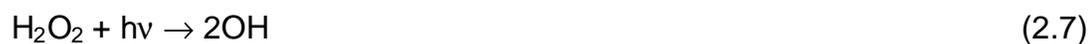
São principalmente duas as moléculas mais importantes que reagem com o monóxido de carbono: o ozônio e a oxidrila OH. Por ser muito reativo o OH é capaz de oxidar praticamente todas as moléculas de hidrocarbonetos, o CO e os poluentes clorados. Sua produção na atmosfera depende da presença de ozônio. A fotodissociação do ozônio produz oxigênio atômico excitado (2.1), que por sua vez pode reagir com uma molécula d'água produzindo duas moléculas de OH (2.2) (Fishman e Seiler, 1983):



A oxidrila OH tem um papel importante na fotoquímica da troposfera, pois como citado anteriormente, vários constituintes emitidos da superfície para a

atmosfera são relativamente pouco solúveis em água como por exemplo, o H₂S e os gases orgânicos, e portanto não seriam retirados pela ação das chuvas e teriam um tempo médio de permanência na atmosfera muito grande. Assim através de reações com o OH vários constituintes como: CO, CH₄, C₂H₆, CH₃Cl, CH₃CCl₃, CH₃Br, H₂S e SO₂ são removidos da atmosfera pela ação das chuvas. (Kirchhoff e Marinho, 1989), (Logan et al, 1981).

A reação do CO com OH representa a maior perda química do CO:



A principal fonte de produção de CO é a oxidação do metano; Kirchhoff (a), 1988:



Com taxa de reação $k = 2,4 \times 10^{-12} \exp(-1710/T)$, sendo T = temperatura. O radical CH₃ se agrega, em seguida, à molécula do oxigênio, em presença de um terceiro corpo M:



A molécula agregada CH₃O₂ eventualmente é transformada em CO via reação catalítica com HO₂, no processo:



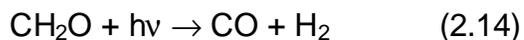
$k = 6 \times 10^{-12}$, seguida de fotodissociação:



Sendo o radical HO_2 regenerado através de:



E o CO pode ser obtido nesse estágio através de mais uma fotodissociação:



A Tabela 2.1 mostra um resumo das principais fontes e sumidouros de CO na atmosfera. De acordo com esses dados temos que a produção de CO nos trópicos (estimada em 260 milhões de toneladas de carbono por ano) devido às queimadas é maior que a produção por queima de combustíveis fósseis, estimada em 190 milhões de toneladas de carbono por ano (Kirchhoff, 1992).

**TABELA 2.1 – PRINCIPAIS PROCESSOS DE EMISSÃO (FONTES) E
REMOÇÃO (SUMIDOUROS) DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) DA
ATMOSFERA**

FONTES E SUMIDOUROS	10⁶ TONELADAS DE CARBONO POR ANO
Fontes	
Oxidação de HC*	290 ⁺
Trópicos	150
Latitudes médias	100
HC antropogênico	40
Oxidação do metano	240
Queima de combustíveis fósseis	190
Queimadas nos trópicos	260
Florestas	160
Campos	100
Queimadas em latitudes médias	20
TOTAL	1000
Sumidouros	
Oxidação por reação com OH	900
Total	900

FONTE: Kirchhoff (1992, p.77).

*HC = Abreviatura de hidrocarboneto;

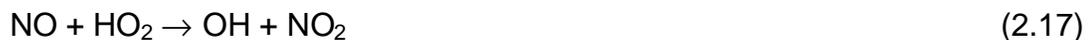
+ As incertezas são da ordem de até 100%

A produção máxima de CO ocorre na superfície, e decresce rapidamente com a altura. A produção na superfície é da ordem de 10^6 moléculas de CO $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. Este valor é 1000 vezes menor na altura de 15 km. Também a concentração decresce com a altura, Fishman e Seiler (1983) mostraram uma média de

gradientes de concentração de 5,5 ppbv/km (ppbv = partes por bilhão por volume ou 1 em 10⁹) entre 0 e 10 km de altura (Kirchhoff e Marinho, 1988).

2.1.2 Ozônio

Durante as queimadas, o CO liberado na atmosfera tropical, pelo processo de combustão incompleta é oxidado pelo radical oxidrila OH. Na presença de radiação ultravioleta (UV) e dos nitrogenados (NO_x) desencadeiam-se outras reações químicas, das quais podem resultar a formação de ozônio (O₃), em concentrações elevadas. A seqüência de reações apresentadas a seguir, o ciclo de poluentes clássico, mostra como esse processo ocorre:



Ao contrário do ozônio estratosférico que desempenha um papel de “escudo protetor” da radiação UV, o ozônio troposférico é um gás poluente e tóxico. De acordo com a legislação brasileira, concentrações de ozônio troposférico de cerca de 80 ppbv, por mais de uma hora, são consideradas perigosas e acima desse valor são ilegais. Estudos mostram que os principais efeitos nocivos do ozônio, em concentrações elevadas, sobre a saúde humana se dá a nível respiratório (Tilton,1989) e também existem citações na literatura de

interferências no desenvolvimento das plantas causadas pelo ozônio (Kirchhoff, 1988a), (Steiguer et al., 1990). Em áreas de grande industrialização as concentrações elevadas de ozônio, decorrem da queima de combustíveis fósseis e nas região predominantemente rurais da queima de biomassa. Na queima de biomassa as altas concentrações de O₃, são produzidas em plumas que se estendem sobre partes maiores do continente tropical e subtropical, durante a estação seca. As maiores concentrações estão comumente entre 100 a 200 ppbv e são encontradas em camadas discretas nas altitudes entre 1 a 5 Km (Crutzen e Andreae, 1990).

Outros estudos tem sido realizados, objetivando constatar experimentalmente a relação entre as queimadas e a conseqüente injeção de monóxido de carbono (CO) na troposfera, com aumentos na concentração de ozônio (O₃); bem como estudos para avaliar os impactos das queimadas na química da troposfera. Como exemplos desses trabalhos nos trópicos, podemos citar: as campanhas na Amazônia, envolvendo as missões Cerrado 90 e Tocantins 91 (Kirchhoff e Marinho, 1994), grandes missões internacionais como **CITE3** – “Global Tropospheric Experiment” (Anderson et al., 1993; Hoell et al., 1993; Andreae et al, 1994), **ABLE-2Ae 2B** – “Atmospheric Boundary Layer“ (Andreae et al., 1988; Gregory et al., 1988; Kirchhoff, 1988b; Kirchhoff et al., 1988; Kirchhoff et al., 1990; Browell et al, 1988; Watson et al., 1990;) e mais recentemente as missão **TRACE A** – “Transport and Atmospheric Chemistry near the Equator-Atlantic” (Kirchhoff et al, 1992; Kirchhoff e Alvalá, 1996; Kirchhoff et al., 1996), no Brasil e no Atlântico Sul e o **SCAR-B** – “Smoke Clouds and Radiation-Brazil” (Alvalá e Kirchhoff,1998), no Brasil. Na África **SAFARI** – “South African Fire-Atmosphere Research Initiative” (Thompson et al., 1996), (Roelofs et al., 1997) e **DECAFE** – “Dynamique et Chimie de l’Atmosphère en Forêt Equatoriale” (Andreae et al., 1992). Além dessas grandes missões outros trabalhos de monitoramento dos gases traço de queimada tem sido feitos, como por exemplo no Brasil (Kirchhoff e Rasmussen, 1990; Kirchhoff et al., 1989), na África (Cros et al., 1987, 1988), na Venezuela (Sanhueza et al., 1985), na Ásia

(Ogawa e Komala, 1988); bem como a aquisição de medidas de concentrações de gases-traço , no Oceano Atlântico, obtidas a bordo de navio (Winkler,1988).

As Figuras 2.2a e b fornecem uma comparação entre concentrações de O_3 e CO , nas estações de seca e chuva e evidenciam a relação do aumento dessas concentrações durante o período de seca e de queimadas (junho a novembro), bem como a relação entre o aumento de CO e de O_3 . Esses dados correspondem a estudos realizados durante a missão TRACE A, no Brasil.

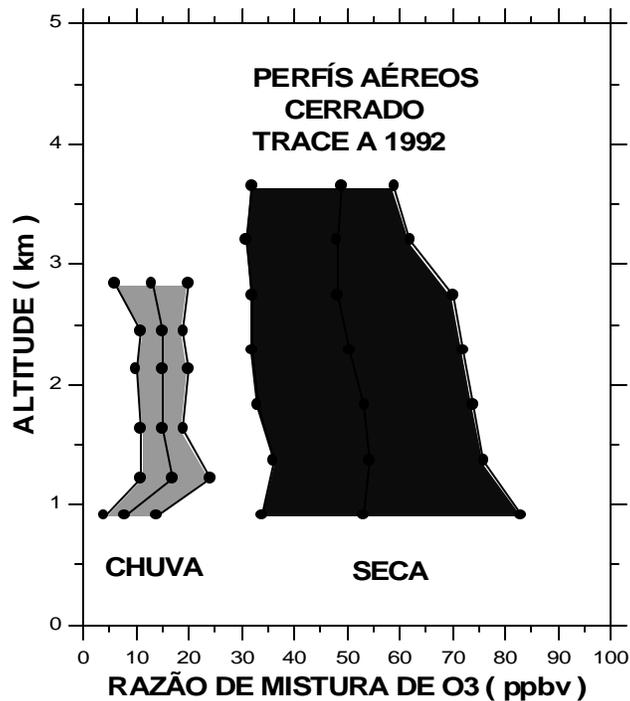


Fig. 2.2a – Concentrações de O_3 médias, máximas e mínimas em experimentos realizados nas estações seca e chuvosa, TRACE A,1992.

FONTE: Adaptada de Kirchhoff e Alvalá (1996, p. 23978).

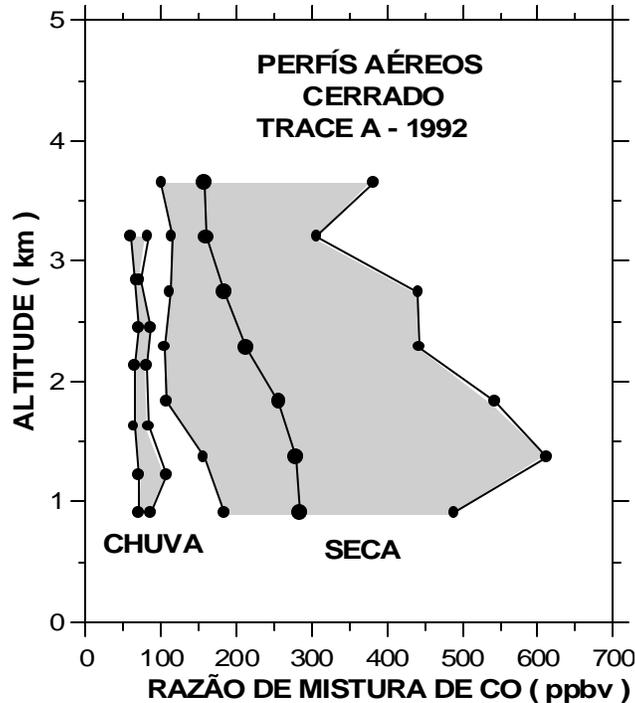


Fig. 2.2b - Concentrações de CO médias, máximas e mínimas em experimentos realizados nas estações seca e chuvosa, TRACE A, 1992.

FONTE: Adaptada de Kirchhoff e Alvalá (1996, p. 23978).

2.1.3 Dióxido de Carbono

O fluxo de carbono, nas diversas formas (gás carbônico, carbonatos, compostos orgânicos, etc...) entre os reservatórios: atmosfera, oceanos e biomassa viva e morta é denominado ciclo do carbono. Os maiores fluxos naturais de carbono ocorrem entre a atmosfera, biomassa viva e a superfície das águas e oceano (Pavão, 1994).

O diagrama da Figura 2.3 mostra de forma simples o ciclo do carbono entre os diferentes reservatórios: a atmosfera, os oceanos (incluindo a biota oceânica); os solos e a biota terrestre (o termo biota refere-se a todos os seres vivos: plantas, árvores, animais, etc., na terra e no oceano, conhecidos como

biosfera). O diagrama mostra também os grandes movimentos do carbono, na forma de dióxido de carbono, dentro e fora da atmosfera, onde a cada ano circula em torno de um quarto do total liberado. Metade deste valor, através da biota terrestre e a outra metade, através de processos químicos e físicos na superfície dos oceanos.

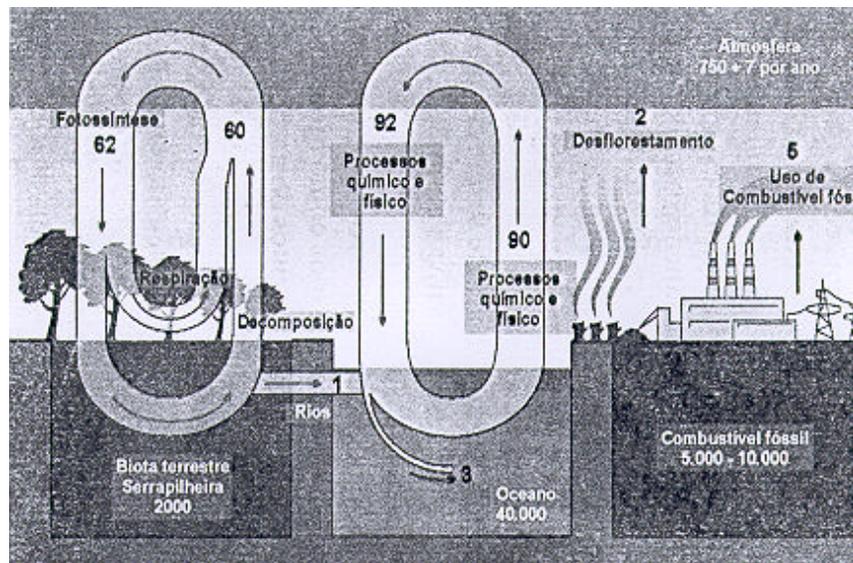


Fig. 2.3 – Os reservatórios de carbono na terra, na biosfera, nos oceanos e na atmosfera e as trocas anuais de dióxido de carbono (expresso em termos de massa de carbono) entre os diferentes reservatórios. As unidades estão expressas em 1000 milhão de toneladas ou gigatons (Gt).

FONTE: Rezende (2000, p.28).

Os reservatórios de CO₂ na terra e nos oceanos são maiores que o total de CO₂ na atmosfera. Pequenas mudanças nesses grandes reservatórios podem causar grandes efeitos na concentração atmosférica. A liberação de apenas 2% de carbono estocados nos oceanos, por exemplo, poderá dobrar a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera.

O carbono emitido para a atmosfera não é destruído, mas sim redistribuído entre os diversos reservatórios de carbono. O dióxido de carbono é muito diferente dos outros gases do efeito estufa (como, por exemplo, o CH₄ e o N₂O), que normalmente são destruídos por ações químicas na atmosfera. Assim, o gás carbônico é um gás inerte, produzido antropogenicamente principalmente pelas queimas de combustíveis fósseis e de biomassa enquanto que os principais sumidouros são os oceanos e a biomassa vegetal viva.

A troca de reservas de carbono acontece em torno de uma larga escala de tempo. Esta escala é determinada pelo tempo cíclico desta troca, que pode variar de menos de um ano a décadas (como por exemplo, trocas entre camada superior do oceano e a terra) ou até mesmo milênios (do fundo do oceano até às formas de vida dos solos terrestres). Assim, o dióxido de carbono é um gás de vida longa na atmosfera (cerca de cem anos).

De acordo com a análise de testemunhos de gelo (Neftel et al., 1982, 1985; Raynaud et al., 1985; Barnola et al., 1983), a concentração pré-industrial de CO₂ na atmosfera era de 280 ppmv (partes por milhão por volume), o que corresponde à uma quantidade de 594 Gt (1 Gt = 10¹² ton). A revolução industrial modificou bruscamente este equilíbrio, desde esta época, a concentração de CO₂ na atmosfera cresceu em torno de 30%, de 280 ppmv no ano de 1700, para valores maiores de 360 ppmv nos dias atuais. Medidas precisas realizadas desde 1959 no observatório de Mauna Loa, no Havaí, mostram que a quantidade de dióxido de carbono está aumentando numa taxa média anual de 1,5 ppmv.

O total dos combustíveis fósseis emitidos na atmosfera gira em torno de 7 Gt de carbono, aproximadamente, que se insere na atmosfera como dióxido de carbono. A queima de combustíveis fósseis incorpora na atmosfera em torno de 5 mil milhões de toneladas (ou gigatons, Gt) para o reservatório de carbono atmosférico a cada ano (Rezende, 2000).

Como exemplos de estudos realizados no Brasil sobre queimadas e CO₂ podemos citar a expedição organizada por Paul Crutzen (agosto e setembro de 1979 e 1980) que parece ter sido a primeira missão científica à observar os gases traços atmosféricos no Brasil, em escala global, em particular na região do cerrado e floresta úmida, no período de seca. Neste experimento utilizou-se uma aeronave equipada com vários sensores, com os quais mediram-se as concentrações de CO₂, O₃, CO NO e NO_x, como também outros parâmetro como: umidade relativa, temperatura, altitude, velocidade e direção do vento. Usando-se garrafas especiais de aço inoxidável, amostras de ar foram coletadas e posteriormente analisadas pela técnica de cromatografia gasosa. Através dessas medidas, determinou-se a razão entre as concentrações de vários gases em relação à concentração de CO₂ e os resultados mais importantes foram: CO/CO₂ = 12 – 15% CH₄/CO₂ = 0,8 – 1,6%, N₂O/CO₂ = 1,5 – 3,0x10⁻⁴% e COS/CO₂ = (4-8)x10⁻⁶%. Conclui-se a partir desses resultados que 11 a 13% do carbono liberado para atmosfera pelas queimadas não é liberado na forma de CO₂ e sim de CO, (Crutzen et al, 1985).

Uma segunda missão científica, organizada pelo INPE e pela NASA, ocorreu em 1985, na região Amazônica. Este experimento denominado GTE ABLE-2A, foi realizado durante os meses de julho/agosto e envolveu cerca de 60 pesquisadores americanos e 100 brasileiros entre pesquisadores e técnicos (Harris et al, 1988) que estudaram o comportamento das concentrações de CO₂ atmosférico na Bacia Amazônica, usando-se medidas de perfis verticais de CO₂ e também fluxos de emissões de CO₂ dos solos. Altas concentrações de CO₂, entre 380 e 400 ppmv foram registradas durante a noite, com uma diminuição durante o dia, mostrando que a floresta atua como uma fonte de CO₂ à noite e um sumidouro durante o dia.

Durante os meses de abril-maio de 1987 um experimento organizado pela NASA-INPE, semelhante ao de 1985, foi realizado também na região Amazônica. Este experimento, denominado GTE-ABLE-2B, foi realizado durante a época das chuvas, ao contrário do experimento ABLE-2A e desta

forma foi possível verificar a influência das queimadas na concentração dos gases traço (Harris et al., 1990). Fan et al., 1990, estimaram as razões de troca de CO₂ entre o solo e a atmosfera, através de medidas de fluxos verticais de CO₂.

Mais recentemente temos o projeto LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) que é uma iniciativa internacional de pesquisa liderada pelo Brasil e vem sendo desenvolvido desde 1997. Esse projeto tem como uma das metas estudar os mecanismos de trocas e armazenamento de carbono na floresta Amazônica (LBA, 1996).

2.2 Caracterização e Descrição da Área de Estudo

Em função da não uniformidade na distribuição espacial das queimadas, o Brasil apresenta grandes contrastes entre regiões fonte e não fonte de queimada. Esses contrastes são decorrentes de fatores climáticos (período de grande estiagem) e regionais (predominância de atividades agropecuárias).

Com base na distribuição dos focos de queimada por mês para cada região brasileira (dados do satélite NOAA 12) para os anos de 1998 e 1999, (ver Figuras 2.4 e 2.5) podemos visualizar uma distribuição quase que padrão dos focos por mês e o enorme contraste que existe no número de focos entre a região centro-oeste e a sul, por exemplo. Esta não uniformidade na distribuição dos focos de queimada/região caracteriza a existência de áreas-fonte e não-fonte de queimada no Brasil, como já comentado. As regiões centro-oeste e norte juntas perfazem um percentual superior a 65% (Figuras 2.6 e 2.7) em contribuição total de focos de queimada, caracterizando-se, portanto, como **áreas fonte** de queima de biomassa ao contrário das demais regiões que correspondem às **áreas não fonte** de queimada.

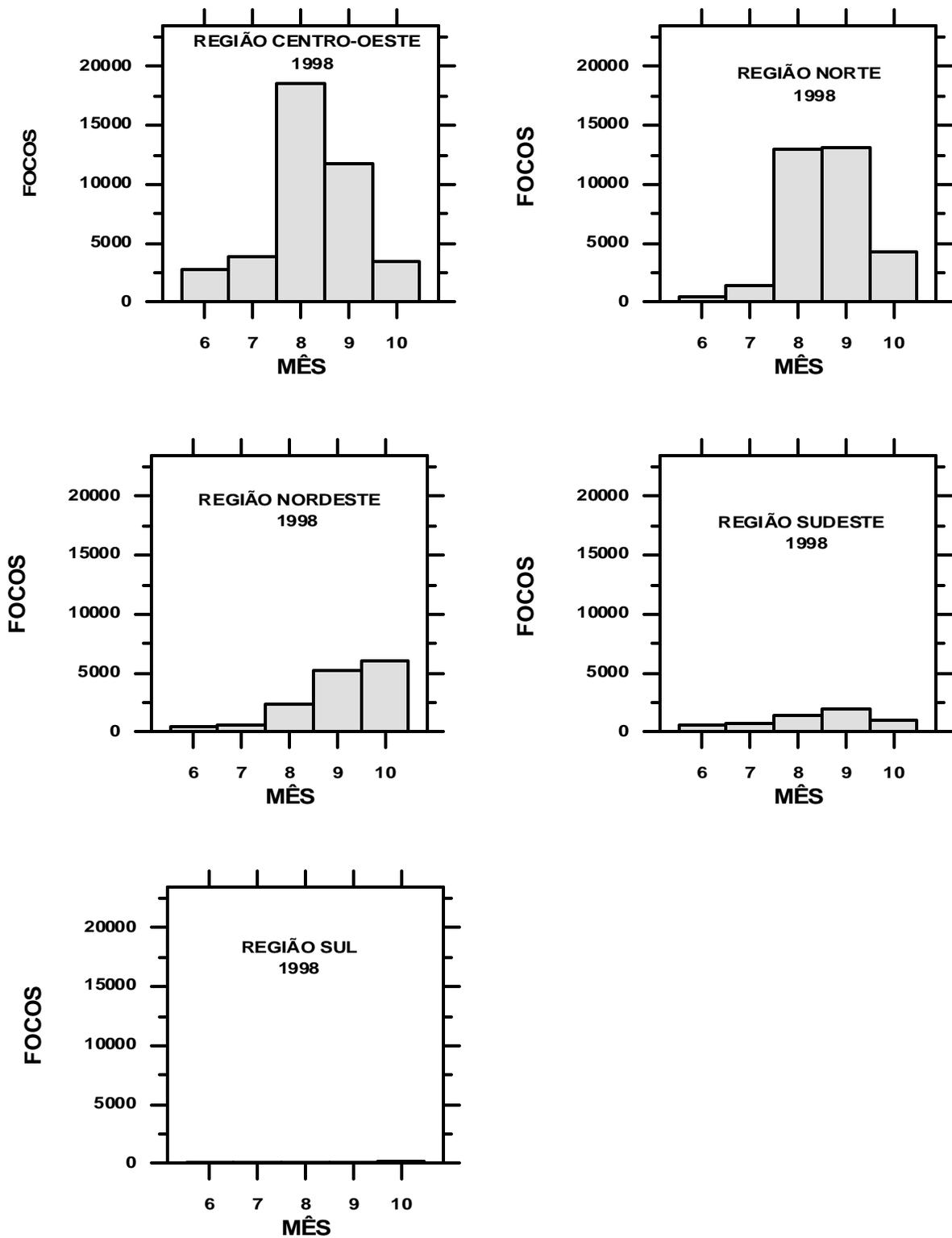


Fig. 2.4 – Distribuição dos focos de queimada/mês e por região brasileira no ano de 1998. (A mesma escala é usada para efeito de comparação).

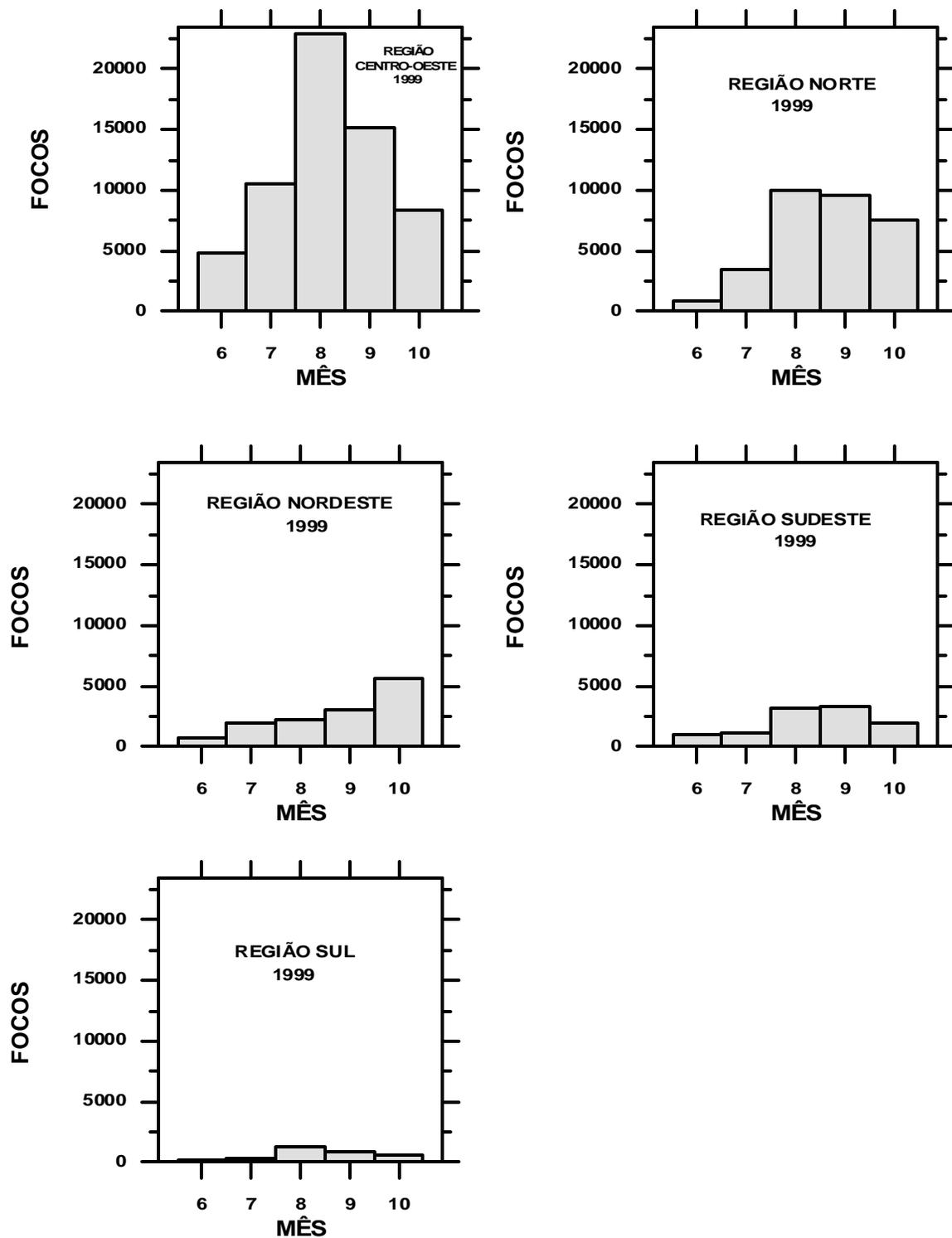


Fig. 2.5 – Distribuição dos focos de queimada/mês e por região brasileira no ano de 1999. (A mesma escala é usada para efeito de comparação).

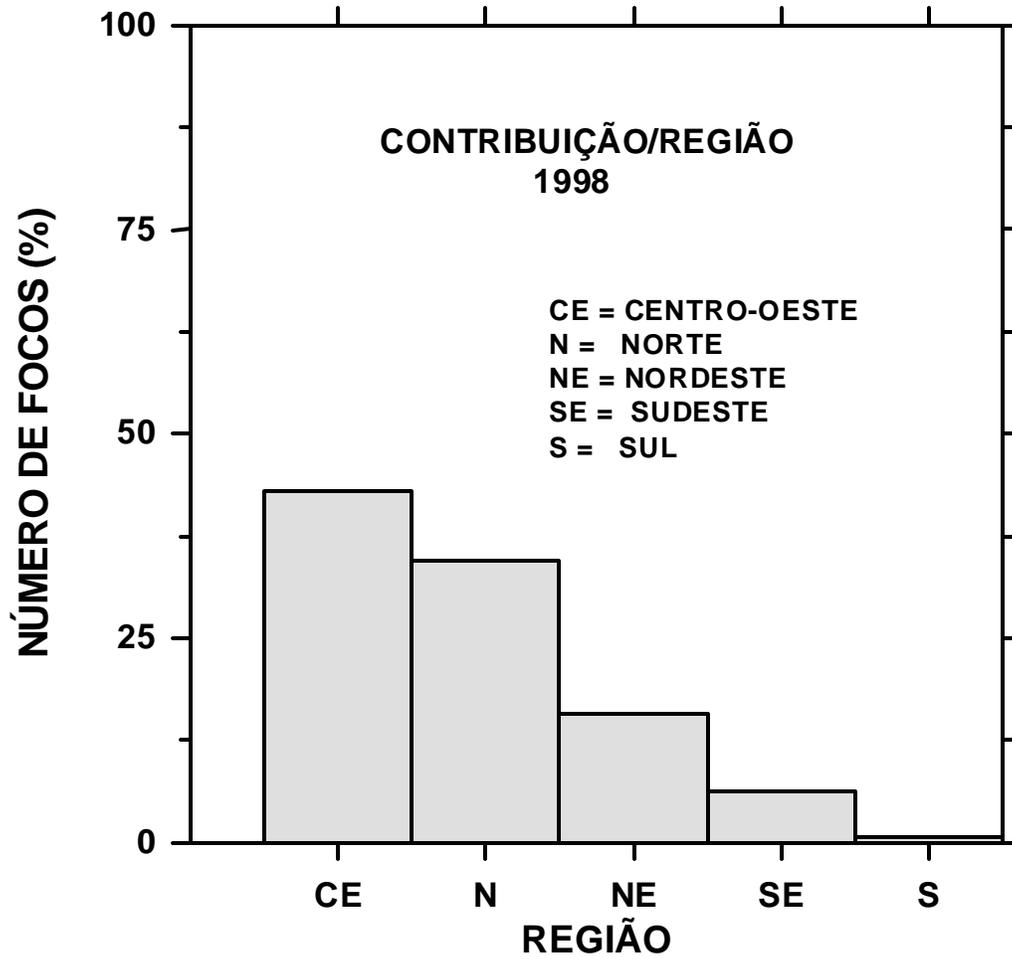


Fig. 2.6 – Contribuição percentual em focos de queimada/região brasileira no ano de 1998.

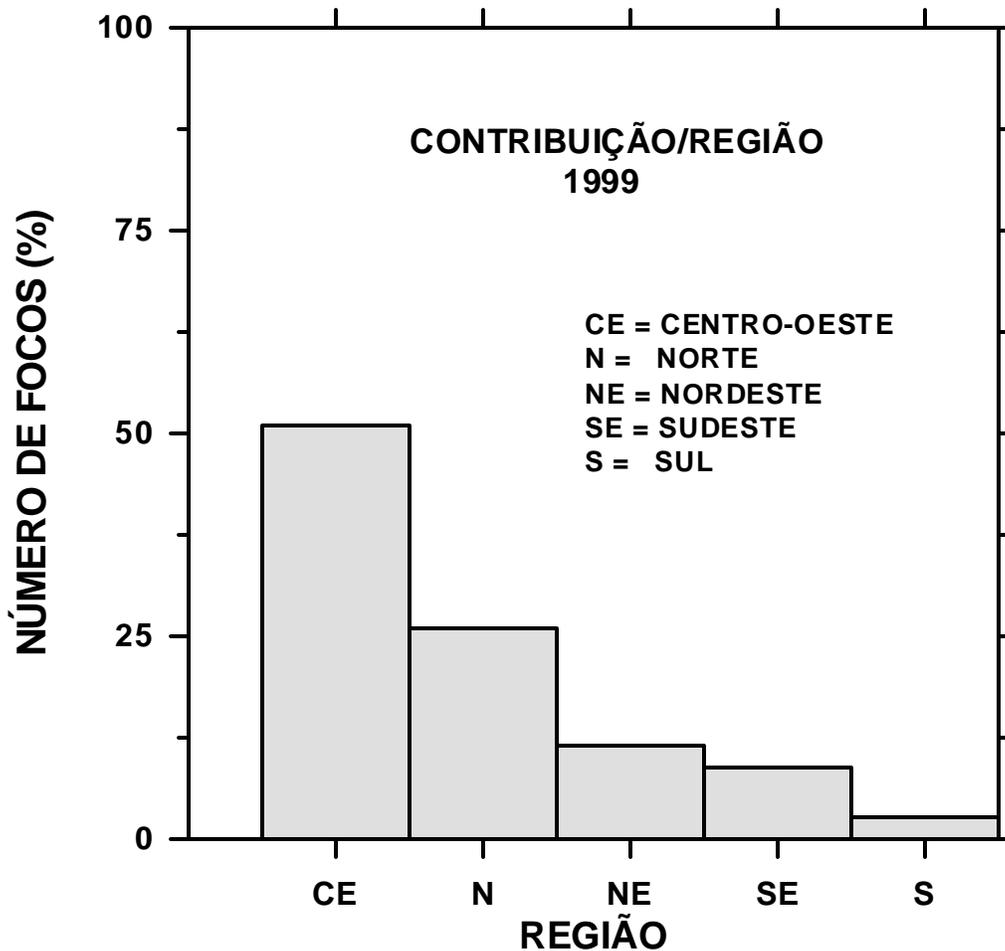


Fig. 2.7 – Contribuição percentual em focos de queimada/região brasileira no ano de 1999.

Assim temos que a maior parte das queimadas no Brasil ocorrem na porção central do país, na região de domínio do bioma cerrado, que conforme citação anterior, caracteriza-se por ter períodos de estiagem muito longos (junho a novembro), com queimas de biomassa fortemente sazonais e cíclicas (alternando em períodos de seca e chuva). O período de queima compreende os meses de junho a novembro, coincidindo com o período de seca. No período de chuva, cerca de 300 mm de chuva/mês são normais, mas durante os meses de seca, as razões de precipitação estão geralmente abaixo de 10 mm/mês (Alvalá e Kirchhoff, 1998).

Por meio de cálculos de trajetórias de massas de ar é possível determinar o caminho do transporte de massas de ar em altitudes definidas. Resultados obtidos através dessa técnica, evidenciam a existência de um "corredor de circulação de massas de ar" (Oceano Atlântico - Região Central do Brasil - Região Sul - Oceano Atlântico) entre regiões fonte e não fonte de queimada, no continente brasileiro em baixas altitudes (cerca de 0 a 4 km), Figura 2.8. Estas trajetórias foram determinadas de acordo com a metodologia utilizada pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) de Cachoeira Paulista (SP), para cálculo de trajetórias de massas de ar pelo método isentrópico, que será discutido posteriormente.

Na Fig.2.8 destacamos algumas cidades, como:

Salvador - BA (12° S, 38° W);

Palmas - TO (10° S, 48° W),

Cuiabá - MT (16° S, 54° W);

Campo Grande – MS (20° S, 54° W);

Curitiba – PR (25° S, 49° W).

A fim de melhor caracterizar esse "corredor de circulação de massas de ar" (Oceano Atlântico – Região Central do Brasil – Região Sul – Oceano Atlântico). Destacamos também a cidade de Natal, RN (6° S, 35° W), onde são feitas, pelo Laboratório de Ozônio do INPE, medidas de concentrações de "background" para gases traço.

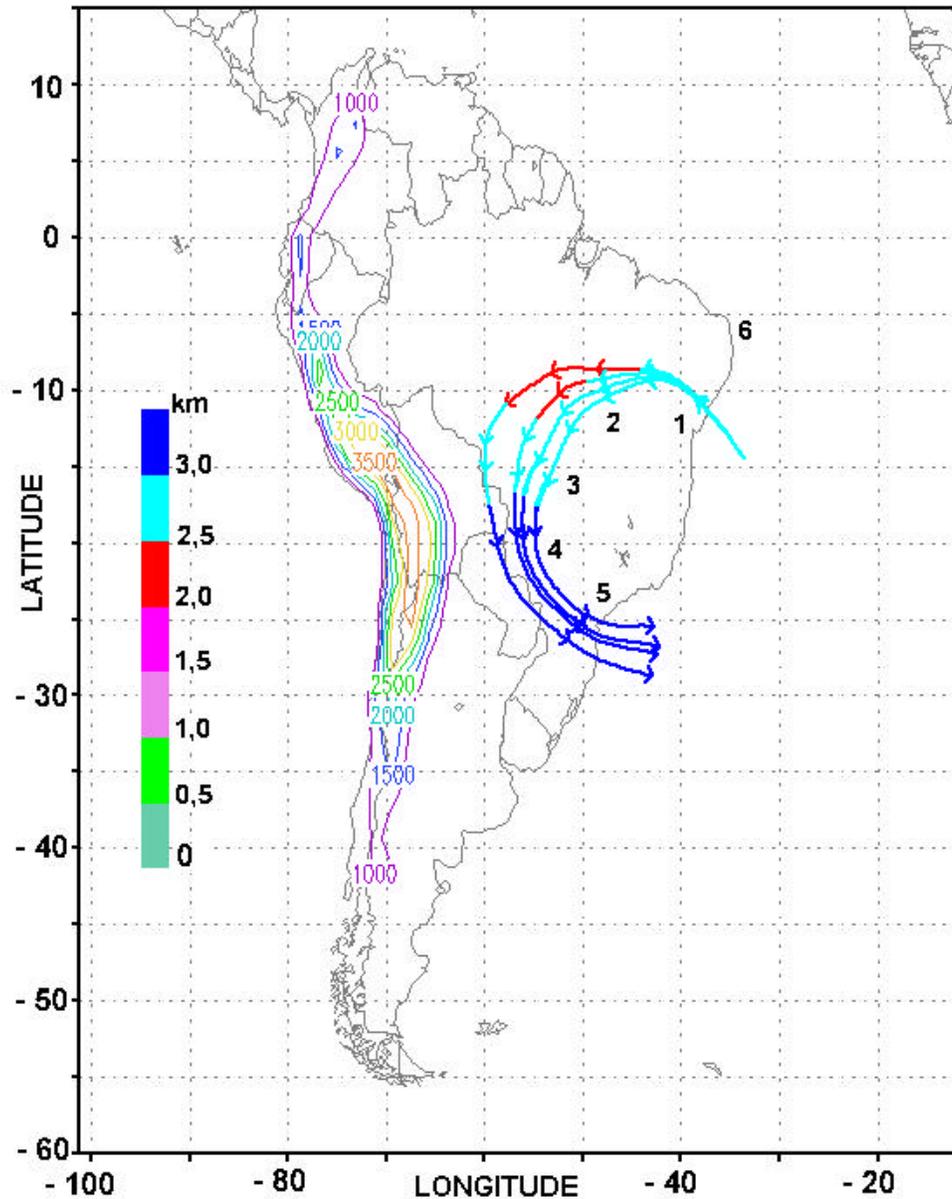


Fig. 2.8 – Trajetórias “forward” para o período de nove dias (24/07 a 01/08/98) em superfícies isentrópicas com temperaturas potenciais de 307,5 K; 308,0 K; 308,5 K e 309,0 K centralizando a região do “corredor de circulação de massas de ar”. **1.** Salvador - BA (12° S, 38° W); **2.** Palmas - TO (10° S, 48° W), **3.** Cuiabá - MT (16° S, 54° W); **4.** Campo Grande - MS (20° S, 54° W); **5.** Curitiba – PR (25° S, 49° W) e **6.** Natal – RN (6° S, 35° W).

Assim, constatamos que as parcelas de ar provenientes do Oceano Atlântico (relativamente isentas de contaminação) ao entrarem no continente brasileiro, pela região nordeste, prosseguem seus deslocamentos por regiões fonte de queimada no Brasil Central (região de Tocantins, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) e em parte pela barreira topográfica natural, representada pela Cordilheira dos Andes e em parte pela força do Anticiclone atmosférico, deixam o continente pela região sul, que constitui uma área não fonte de queimada. Esse sistema de circulação de massas de ar no continente brasileiro define linhas de fluxo concêntricas que ao passarem por regiões fonte de queimada são enriquecidas por contaminantes produzidos “in loco”, sendo então transportadas, em geral num curto intervalo de tempo (período inferior a vinte dias) para outras regiões não fonte. Um de nossos objetivos é quantificar, em termos de concentrações de monóxido de carbono, a influência das queimadas realizadas no bioma cerrado (Brasil Central), sobre regiões de baixo índice de queima de biomassa.

2.2.1 Meteorologia da Área de Estudo

Do ponto de vista meteorológico, o “corredor de circulação de massas de ar” identificado pelos cálculos de trajetória de massas de ar, representa um padrão típico de circulação no continente brasileiro (troposfera) para o período de inverno.

Segundo Nobre et al. (1998) as principais características do sistema de circulação de larga escala na baixa troposfera que atua na América Sul durante o inverno são: a Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) sobre o oceanos Atlântico e Pacífico associada às atividade convectivas no noroeste da América do Sul (Colombia, Venezuela) e América Central, os sistemas transientes frontais (FSs) associados às frentes frias na América do Sul temperada e subtropical e o Sistema de Alta Pressão Subtropical do Oceano Atlântico (SASH) ou também chamado Anticiclone do Atlântico Sul, Figura 2.9.

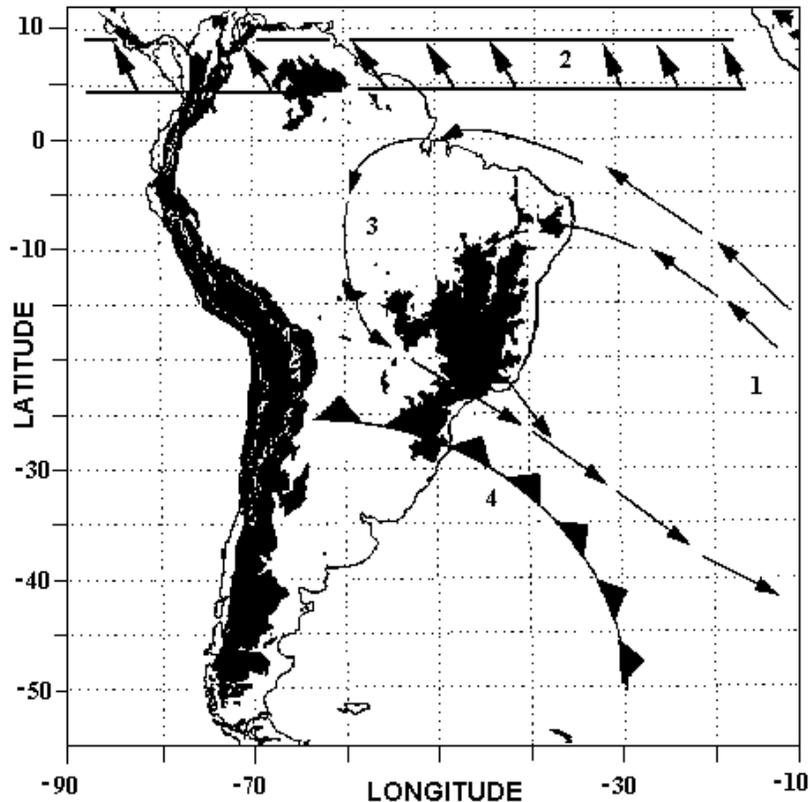


Fig. 2.9 – Principais sistemas que afetam a circulação da troposfera, no Brasil durante o inverno: 1) Anticiclone do Atlântico Sul - SASH, 2) Zona de Convergência Intertropical - ITCZ, 3) Região de Subsidência de Larga Escala (Brasil Central) 4) Sistemas Transientes Frontais (Frentes Frias) - FSs.

FONTE: Adaptada de Nobre et al. (1998, p. 31811).

Durante o inverno ocorre o deslocamento para oeste (em direção ao continente) do Anticiclone do Atlântico Sul (SASH) e o movimento para o norte da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) que produzem uma subsidência de larga escala típica sobre o Brasil Central e a Amazônia, deslocando umidade e nuvens para áreas remotas ao norte e noroeste da Amazônia. Esses fenômenos são responsáveis pela escassez de chuvas sobre o

continente e pela definição da estação seca no Brasil Central (Longo et al., 1999), (Vianello e Alves, 1991).

O deslocamento do SASH, em direção ao continente favorece a entrada de massas de ar, provenientes do oceano, pela porção nordeste do Brasil. A Figura 2.10 mostra uma configuração típica média dos ventos para o mês de julho em 850 hPa (cerca de 2,5 km de altura), que evidencia o padrão de circulação descrito no Brasil e o Anticiclone do Atlântico Sul.

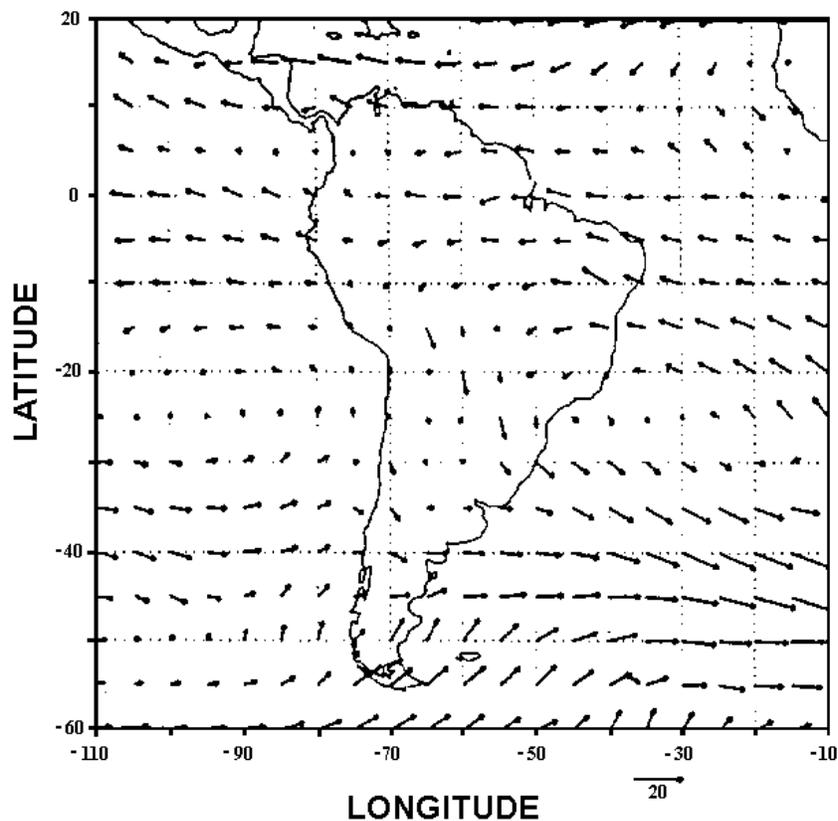


Fig. 2.10 – Distribuição típica do vetor vento médio ($m.s^{-1}$) para julho em 850 hPa.

FONTE: Adaptada de Satyamurty et al. (1998, p.121).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

Neste Capítulo apresentaremos e discutiremos a metodologia e equipamentos utilizados neste trabalho.

3.1 Cromatografia Gasosa

A técnica de medida de concentrações de monóxido de carbono (CO), descrita na literatura por Seiler e Junge (1970) e Seiler (1974), baseia-se no método de separação cromatográfica seguida por detecção de vapor de mercúrio, Figura 3.1. Sendo amplamente utilizada, essa técnica apresenta boa resolução e precisão de 0,2%, bem como linearidade de resposta (Mariano, 1992).

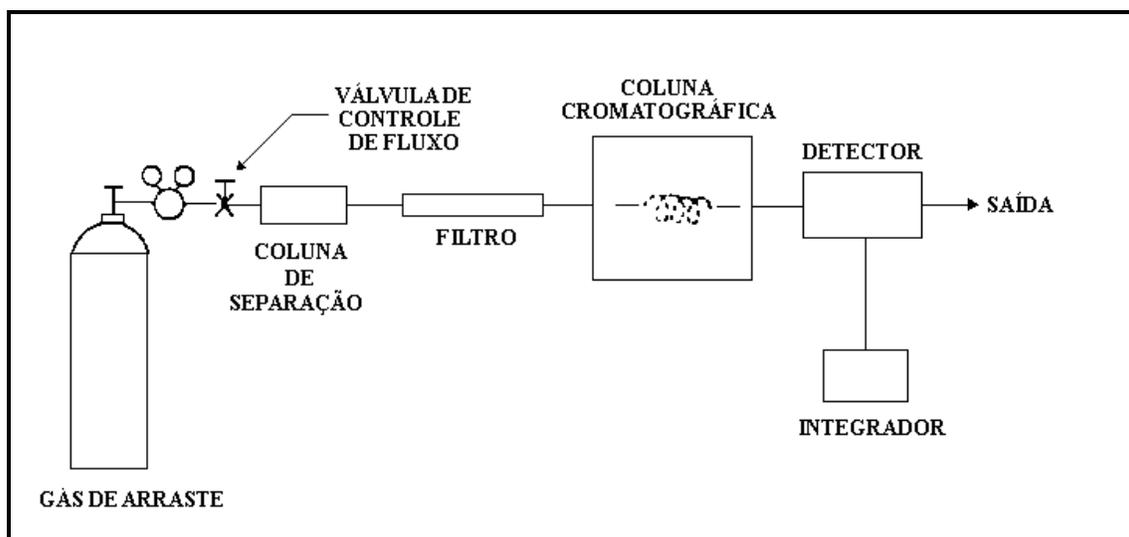


Fig. 3.1 - Diagrama esquemático do cromatógrafo.

FONTE: Adaptada de Mariano (1992, p.39).

As amostras de ar são coletadas por uma pequena bomba de sucção, que pressuriza garrafas de aço inoxidável, especialmente construídas para esse propósito. Essas garrafas tem capacidade de 800 ml e são eletropolidas internamente, a fim de evitar a fixação de moléculas de gases nas paredes, Figura 3.2.

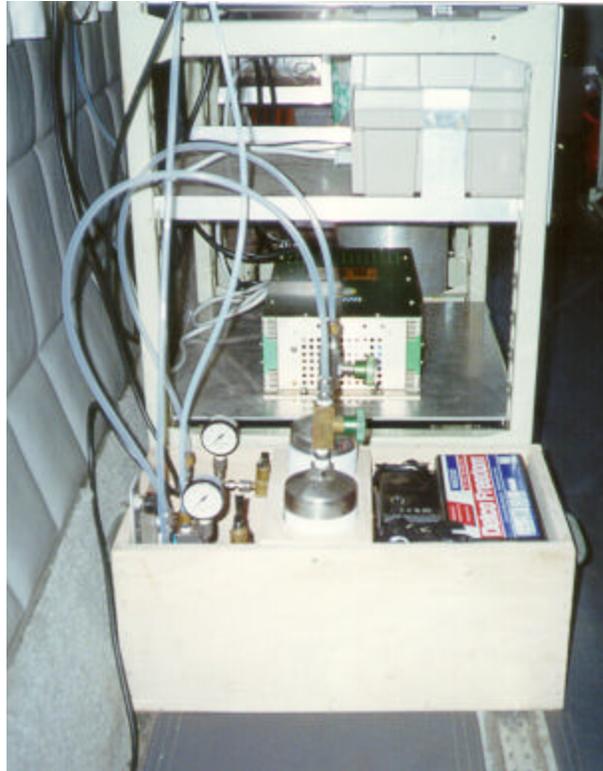
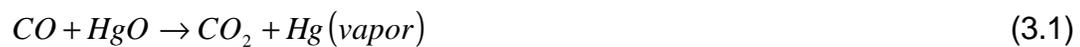


Fig. 3.2 - Sistema de amostragem de gases para posterior análise cromatográfica.

A análise de uma dessas garrafas pelo método de cromatografia é feita em cerca de 5 minutos (Kirchhoff e Marinho, 1988; 1990). A amostra a ser analisada é injetada no módulo cromatográfico, na coluna de amostragem, que tem 2 ml de volume. Essa coluna de amostragem é inserida em série com a coluna de separação, através de uma válvula de seis vias, e a amostra é então levada à coluna de separação pelo gás de arraste (ar sintético). O gás de arraste é seco e filtrado para eliminar possíveis interferências de hidrocarbonetos e dióxido de

enxofre (SO₂), que também podem reagir com o óxido de mercúrio. A concentração de CO na amostra é determinada por comparação com os gases de calibração (Kirchhoff and Rasmussen, 1990).

A coluna de separação é a coluna cromatográfica propriamente dita, onde os diversos componentes da amostra são separados por adsorção temporária, nas partículas do material da coluna, mantida à temperatura de 80 °C (processo de separação cromatográfica). Os gases são então conduzidos a um segundo módulo, que tem a função de detectar o CO. Os gases passam primeiro pela câmara reatora onde uma camada de HgO entra em contato com os gases da amostra a uma temperatura de 160 °C. É nesse reator que o CO é transformado em CO₂, liberando o Hg (vapor), conforme reação 3.1:



O vapor de mercúrio é medido através de um sistema óptico, onde ocorre a absorção da radiação UV de uma lâmpada de Hg, sendo que a radiação atenuada pelo vapor de Hg é proporcional à quantidade de CO presente na amostra. O resultado é enviado a um monitor (Figura 3.3) que é em geral um registrador de pena ou um integrador (Kirchhoff e Marinho, 1988). A unidade de medida é partes por bilhão por volume (ppbv), por comparação com um gás de concentração conhecida.



Fig. 3.3 – Cromatógrafo do Laboratório de Ozônio do INPE de São José dos Campos (SP).

3.2 Fotômetro O₃ – UV

As primeiras constatações da presença de ozônio na atmosfera foram feitas no começo do século dezoito, porém o mesmo só foi reconhecido como um constituinte atmosférico em 1840, por Schönbein. Em 1858, o químico francês M. A. Housean comprovou a existência do ozônio troposférico. O conhecimento de que a radiação UV é absorvida pelo ozônio permitiu a obtenção de medidas de O₃ na atmosfera. Para observação de ozônio troposférico o equipamento utilizado é o fotômetro de O₃ – UV (sensor de O₃).

O sensor de O₃ opera baseado no princípio físico da absorção da radiação ultravioleta por ozônio. A radiação UV que atravessa uma dada amostra de ar contendo ozônio é atenuada quando absorvida por este gás-traço. Esta atenuação é expressa pela Lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0 \exp (- XLC) \quad (3.2)$$

Onde:

I = intensidade da radiação atenuada;

I₀ = intensidade da radiação sem atenuação;

X = coeficiente de absorção (308 cm⁻¹ bar⁻¹);

C = variação da concentração de ozônio em ppbv

$$\text{ou } \left(ppbv = \frac{P_{gás}(nbar)}{P_{atm}(mbar)} \times 1000 \right);$$

L = caminho óptico percorrido pela radiação UV (cm).

O equipamento possui três subsistemas: óptico, de fluxo e eletrônico, Figura 3.4. O sistema óptico consiste de uma fonte UV, uma célula de absorção e dois detectores. O detector 1 (detector de amostra), colocado na direção oposta à fonte UV, na célula de absorção, mede a atenuação da radiação UV devido à presença de ozônio. A fonte UV é uma lâmpada de vapor de mercúrio (Hg) com linha de emissão centrada em 253,7 nm. O detector 2 (detector de controle), próximo a lâmpada UV, mede as variações da intensidade da luz.

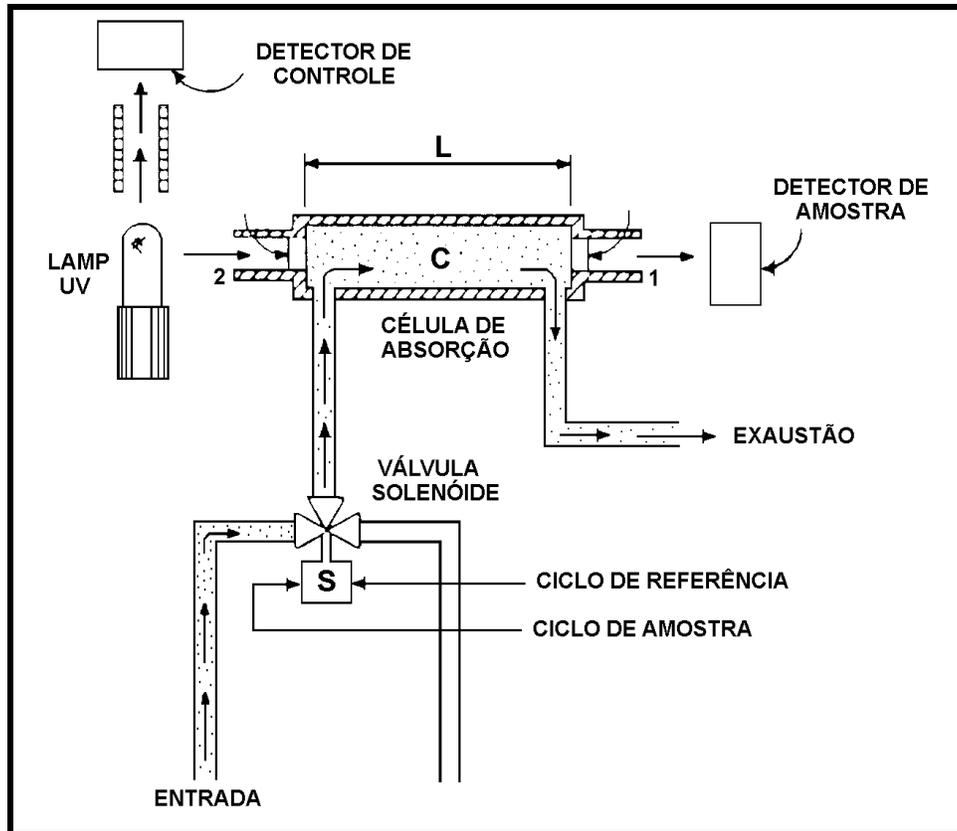


Fig. 3.4 - Diagrama do fotômetro de O₃ – UV.

FONTE: Mariano (1992, p. 41).

O sistema de fluxo compreende os terminais de exaustão, célula de absorção, medidor de fluxo, válvula solenóide, filtro de ozônio e bomba. O medidor de fluxo está localizado entre a célula de absorção e o terminal de exaustão. A medida da concentração de O₃ independe da taxa de variação do fluxo. A válvula solenóide permite que a amostra de ar seja conduzida, ora para a célula de absorção, ora para o filtro de ozônio. O filtro de O₃ é um recipiente de alumínio contendo dióxido de manganês (MnO₂) que atua como um catalisador na reação entre O₃ e O₂. Desta forma, este filtro elimina o ozônio contido na amostra. A amostra enviada para a célula de absorção após passar pelo filtro de O₃ mantém todas as suas propriedades exceto pela presença de O₃. Obtém-se, assim, uma medida da intensidade da radiação UV sem atenuação. A

amostra de ar, quando enviada diretamente para a célula de absorção, atenua a intensidade da radiação UV. Medidas alternadas da radiação UV, obtidas através do ciclo de referência (sem O₃) e através do ciclo de amostra (com O₃), podem ser comparadas e esta comparação fornece a quantidade de O₃ presente na amostra de ar.

O sistema eletrônico fornece o sinal e realiza todas as operações necessárias para fornecer a concentração em unidades apropriadas. A unidade de medida é partes por bilhão por volume - ppbv, (Mariano, 1992).

3.3 Analisador de CO₂

As medidas de concentração de CO₂ são baseadas na diferença de absorção da radiação infravermelho emitida por uma lâmpada, que atravessa duas células: uma célula de amostragem que contém um gás de concentração desconhecida e outra de referência que contém um gás de concentração conhecida. Através de uma bomba de sucção e de um tubo de teflon ligados ao aparelho, o ar é continuamente introduzido na célula de amostragem e valores da concentração de CO₂ São fornecidos em intervalos de tempo que variam de 1 a 3600s. Estes valores são fornecidos em partes por milhão por volume (ppmv) e são mostrados num display, em uma registradora ou enviados diretamente para um microcomputador. Este analisador funciona em dois modos: no diferencial e no absoluto. A diferença entre eles está na concentração de CO₂ do gás usado na célula de referência. Enquanto que no modo diferencial a concentração de CO₂ situa-se na faixa de concentração do ar ambiente, no modo absoluto a concentração de CO₂ é zero, pois neste caso o ar antes de penetrar a célula de absorção, atravessa um filtro que elimina o CO₂.

A Figura 3.5 mostra o esquema do analisador e seus principais componentes. A célula de referência contém um gás cuja concentração de CO₂ é conhecida ao passo que na célula de amostragem a concentração do gás é

desconhecida. A radiação infravermelha é transmitida através de ambas as células e a saída do analisador é proporcional à diferença de absorção entre as duas.

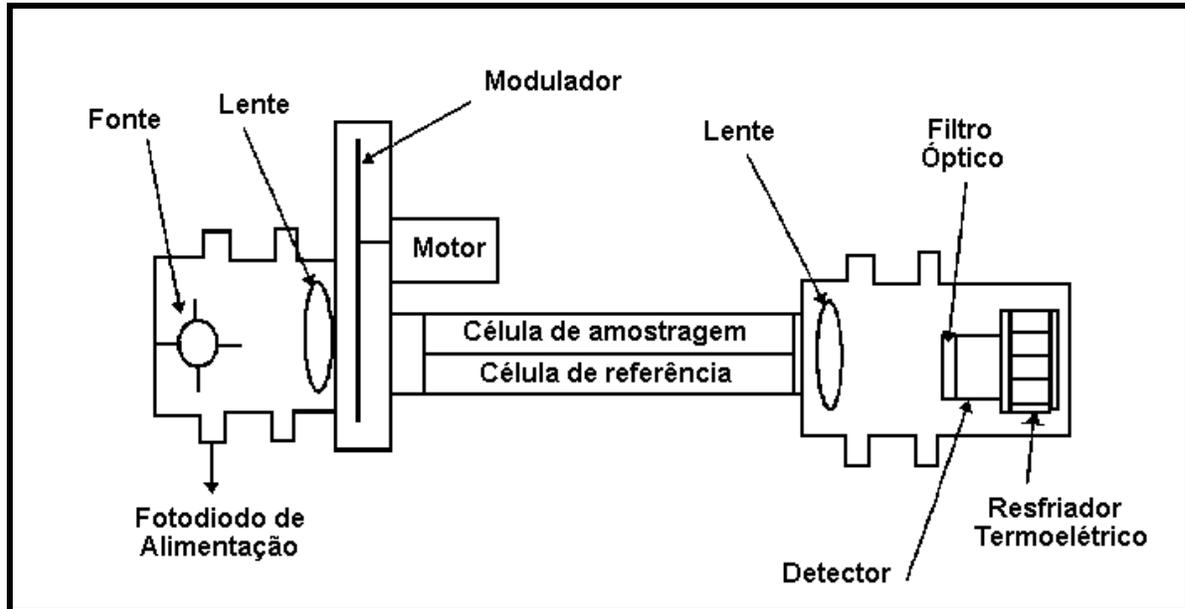


Fig. 3.5 - Esquema do analisador de CO₂.

FONTE: LI-COR (1990, p.5-1)

A fonte de radiação infravermelha é selada a vácuo e possui alta estabilidade. Um circuito óptico de alimentação com um fotodiodo mantém a fonte a uma temperatura constante (1000 K) e um refletor metálico ao redor da fonte intensifica a radiação da fonte e diminui a potência requerida.

A radiação emitida pela fonte é mecanicamente modulada por um disco, acionado por um motor que gira a uma frequência de 500 Hz. Este modulador contribui para um maior tempo de vida da fonte e para um menor ruído. O caminho óptico entre a fonte e o sistema óptico é totalmente vedado e livre de CO₂, já que possui um filtro acoplado a esse sistema que absorve o CO₂.

Um filtro óptico com banda de passagem de 150 nm é utilizado para possibilitar que o detector receba a energia na faixa da banda de absorção do CO₂ que é de 4,26 μm. Este procedimento fornece uma excelente rejeição da radiação infravermelha, fora da banda desejada, permitindo ao detector rejeitar respostas de absorção de radiação por outros gases. O detector é um dispositivo feito de um material que é insensível a vibrações e encontra-se resfriado à -12 °C através de resfriadores termoelétricos. Para manter o compartimento do detector livre de vapor d'água e CO₂, existe um pequeno recipiente de perclorato de magnésio que é acoplado no compartimento do detector.

A radiação infravermelha a partir da fonte é direcionada através das células de gás e para o detector pelas lentes localizadas em cada extremidade do ramo óptico de modo a obter um sinal máximo no detector.

Esse sistema fornece um nível de ruído baixo que é tipicamente de 0,2 ppm em 350 ppm, (LI-COR, 1990; Pavão, 1994).

3.4 O Uso do Avião do INPE para Medidas de Gases Traço

O avião do INPE é um bi-motor tipo Bandeirante, modelo EMB 110. Inicialmente era usado em estudos de aerofotogrametria, mas ultimamente, tem sido cada vez mais utilizado para a realização de medidas de gases traço na atmosfera, Figura 3.6. Por não ser pressurizado seu uso limita-se a altitudes inferiores a 5 km. Para casos especiais pode-se usar máscaras de oxigênio, mas isto impõe um esforço adicional aos operadores, por isso é evitado (Kirchhoff e Alvalá, 1996).



Fig. 3.6 – Vista lateral do avião Bandeirante do INPE.

Os equipamentos para medidas de gases traço são montados num armário de aço tipo rack que posteriormente é fixado no avião, como indicado na Figura 3.7. As amostras de ar são conduzidas aos medidores, por entradas de ar conectadas na parte externa da aeronave que com auxílio de uma bomba à vácuo realiza a sucção do ar para dentro da instrumentação, Figura 3.8, (Kirchhoff et al., 1988; 1990).



Fig. 3.7 – Vista interna do avião Bandeirante do INPE e do rack instrumentalizado, instalado na aeronave.



Fig. 3.8 - Entrada de ar externa à aeronave.

3.5 Detecção de Queimadas pelo Sistema Imageador AVHRR/NOAA

Considerando a extensão territorial do país e a relativa falta de condições de controle e fiscalização do fogo, a utilização do sensoriamento remoto orbital, para a detecção e monitoramento de queimadas no Brasil tem se mostrado uma técnica eficiente. Através de imagens termais (faixa de 3,55 – 3,95 μm) diárias dos satélites meteorológicos da série NOAA, tem sido possível, desde 1987, a detecção de queimadas (focos de calor) em tempo quase-real para o período de 01 de maio a 30 de novembro, época de estiagem no Brasil Central e Sul da Amazônia. Desde agosto/1995, a obtenção dessas imagens tem sido feita pelos satélites NOAA 12 e 14 (Setzer, 1992).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) possui, na cidade de Cachoeira Paulista (SP), uma estação receptora de imagens AVHRR/NOAA (Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration). O sistema de detecção de queimadas em uma imagem AVHRR em uso operacional no INPE envolve cinco etapas principais:

- 1) Recepção da imagem;
- 2) Seleção das queimadas na imagem;
- 3) Obtenção das coordenadas geográficas das queimadas, à medida que a imagem é analisada;
- 4) Elaboração de produtos de acordo com as necessidades dos usuários;
- 5) Envio de produtos aos usuários.

A Figura 3.9 corresponde ao produto final da análise de focos de queimada, proveniente do satélite NOAA 12, para o mês de setembro/1999 e representa a distribuição espacial das queimadas no Brasil para o referido período.

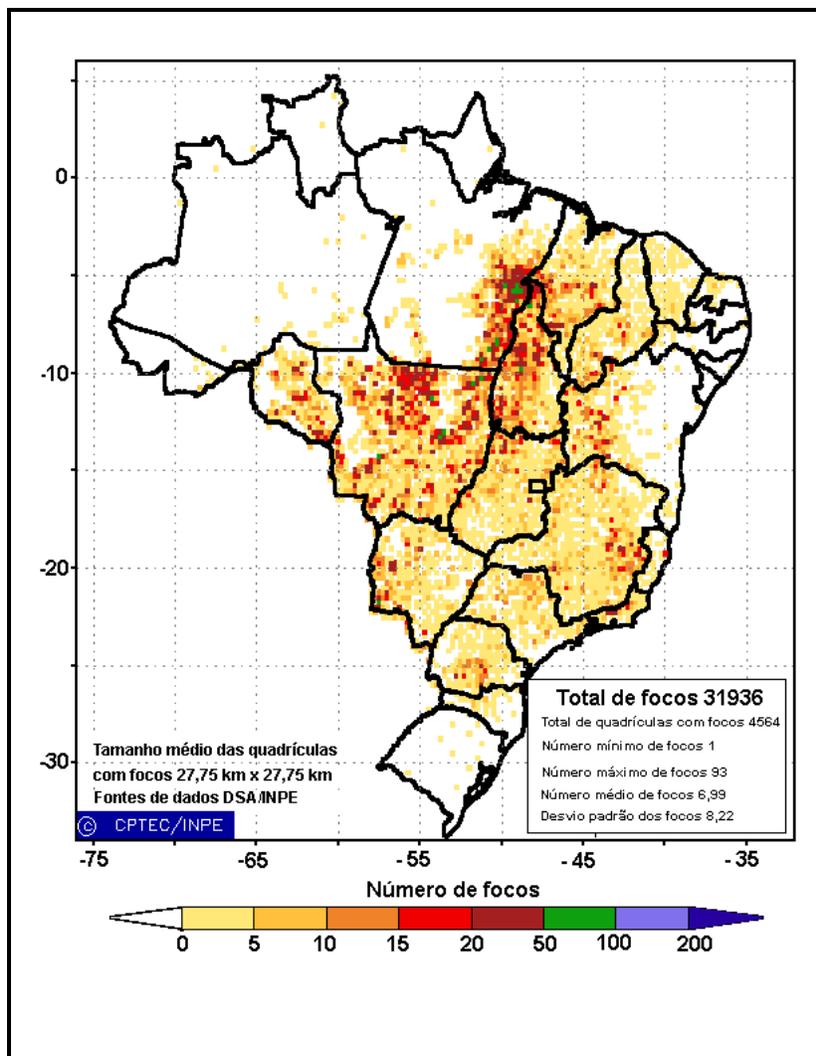


Fig. 3.9 – Mapa do Brasil com a distribuição espacial dos focos de queimada para o mês de setembro de 1999.

FONTE: CPTEC/INPE (1999).

3.6 Cálculo de Trajetórias de Massas de Ar

No estudo da presença de contaminantes atmosféricos é muito importante o conhecimento da procedência (origem) das massas de ar e seus deslocamentos, pois a presença de um poluente atmosférico numa região, pode ser devido à produção “in loco” e/ou a processos de transportes.

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 velocidade em parte é devido a movimentos 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 podemos mapear esses deslocamentos. Assim, uma ferramenta importante para o estudo de transporte dos contaminantes atmosféricos, em diferentes níveis de pressão, tem sido o cálculo de trajetórias de massas de ar em função do tempo (Doty e Perkey, 1993).

Esses cálculos baseiam-se em parâmetros de entrada tais como: campos de ventos (horizontal e vertical), altura geopotencial, temperatura potencial, níveis de pressão, que correspondem a dados provenientes de estações de superfície, navios, bóias, balões climáticos e satélite, obtidos através de grandes centros meteorológicos, como por exemplo, o National Center for Environmental Prediction – NCEP, na utilização de programas computacionais para a resolução das equações de movimento das parcelas de ar e na aplicação de técnicas de interpolação para o cálculo dos valores desconhecidos em pontos irregulares (Austin e Tuck, 1985; Merrill et al., 1986), (Thompson et al, 1996).

3.6.1 Fundamentos do Cálculo de Trajetórias de Massas de Ar

As equações que descrevem o movimento das parcelas de ar num sistema tridimensional são:

$$\frac{dx}{dt} = u; \quad \frac{dy}{dt} = v; \quad \frac{dz}{dt} = w \quad (3.2)$$

Onde u , v e w são as componentes zonal, meridional e vertical, respectivamente das parcelas de ar, considerando um sistema referencial

meteorológico: direção x de oeste para leste; y sul para norte e z vertical para cima.

A integração desse conjunto de equações sob as condições iniciais:

$$x(t=0) = x_0;$$

$$y(t=0) = y_0;$$

$$z(t=0) = z_0;$$

$$u = \langle u \rangle = \frac{u_a + u_b}{2};$$

$$v = \langle v \rangle = \frac{v_a + v_b}{2};$$

$$w = \langle w \rangle = \frac{w_a + w_b}{2}$$

Nos fornece as expressões para o cálculo da trajetória das partículas (Troniskov e Nobre, 1998). Assim, temos:

$$x_b^{k+1}(t + \Delta t) = x_a(t) + \frac{\Delta t}{2} \{u_a(x_a, t) + u_b(x_b^k, t + \Delta t)\} \quad (3.3)$$

$$y_b^{k+1}(t + \Delta t) = y_a(t) + \frac{\Delta t}{2} \{v_a(y_a, t) + v_b(y_b^k, t + \Delta t)\} \quad (3.4)$$

$$z_b^{k+1}(t + \Delta t) = z_a(t) + \frac{\Delta t}{2} \{w_a(z_a, t) + w_b(z_b^k, t + \Delta t)\} \quad (3.5)$$

Em nosso estudo utilizamos um $\Delta t = 1h$, que segundo dados da literatura e resultados experimentais representa um bom intervalo de tempo para os cálculos de trajetória (Doty e Perkey, 1993). Nas equações 3.3 a 3.5, os índices **a** e **b** representam, respectivamente, os valores conhecidos e os desconhecidos que são determinados por interações e os sub-índices k representam o número de interações. As interações para o cálculo dos valores interpolados são feitas até que seja satisfeita a condição:

$$\sqrt{(x^k - x^{k-1})^2 + (y^k - y^{k-1})^2} < \epsilon \quad (3.6)$$

Onde $\epsilon = 1$ km. Com a definição de ϵ , garantimos a precisão dos cálculos dos valores interpolados para definir a trajetória das parcelas de ar.

Existem diferentes modelos para os cálculos de trajetórias: isentrópicos, isobáricos ou cinéticos. No modelo isentrópico, as trajetórias são calculadas com base no deslocamento das parcelas de ar sobre superfícies isentrópicas (superfícies de mesma temperatura potencial), num movimento adiabático e não são feitas considerações sobre a velocidade vertical (w). No isobárico o deslocamento das parcelas é avaliado sobre superfícies com pressão constante. O modelo cinético requer informações sobre o campo de velocidades verticais (Kahl, et al., 1989).

No modelo isentrópico, utilizado nesse trabalho, as superfícies isentrópicas foram determinadas a partir da resolução da equação que define temperatura potencial:

$$F(p) = \mathbf{q} - T(p) \left(\frac{p_o}{p} \right)^{\gamma/C_p} = 0 \quad (3.7)$$

Onde:

θ = Temperatura potencial;

T = Temperatura;

P_0 = Pressão na superfície (100 kPa ou 1000 mb);

P = pressão numa dada altitude;

C_p = Calor específico do ar seco à pressão constante ($1004 \text{ J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$);

R = Constante dos gases ($287 \text{ J.K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$).

A temperatura potencial é definida como sendo a temperatura que uma porção de ar teria, se fosse trazida, por variações adiabáticas secas à pressão de 1000 mbar. Assim, a temperatura potencial é a temperatura real reduzida adiabaticamente (sem transferência de calor) à uma pressão-padrão (Blair et al., 1964), (Vianello e Alves, 1991).

Para a solução da equação (3.7) é usado o método iterativo de Newton:

$$p^{k+1} = p^k - \frac{F(p^k)}{F'(p^k)} \quad (3.8)$$

E técnicas de interpolação para a determinação da temperatura em pontos irregulares. Os sub-índices k representam o número de interações.

A Figura 3.10 mostra o resultado do cálculo de superfície isentrópica para a temperatura potencial de 307,5 K. Assim, para uma dada temperatura potencial (θ), temos a configuração da distribuição de pressão (linha de isovalores) e campo de ventos (representados por vetores).

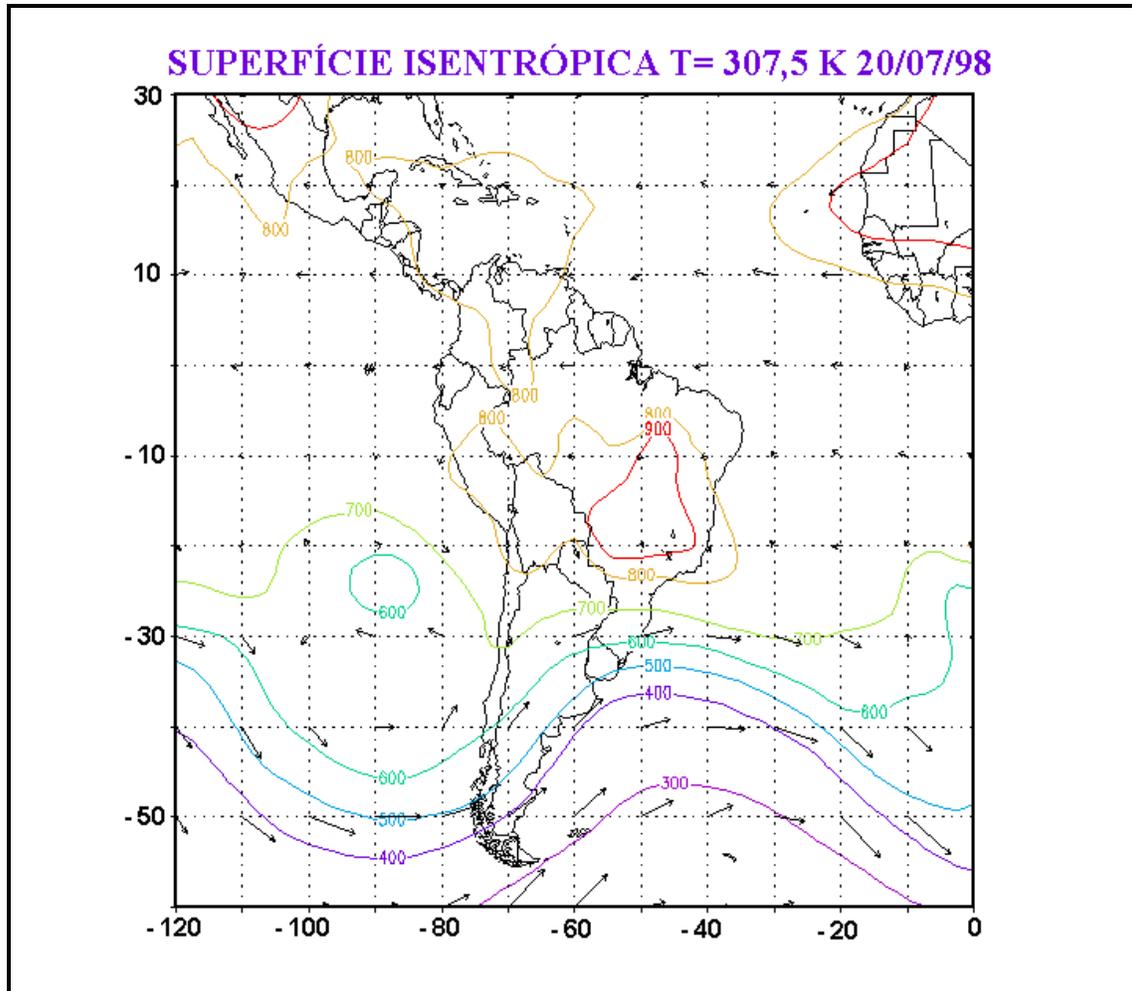


Fig. 3.10 – Distribuição de pressão em mbar (linhas de isovalores) e ventos (vetores) para a temperatura potencial de 307,5 K, em 20/07/98.

As trajetórias isentrópicas tem sido amplamente utilizadas (Pickering et al., 1994, 1996) e têm a vantagem de não requerer a velocidade vertical do vento, enquanto que o formalismo cinemático utiliza as componentes do campo de vento para o cálculo de trajetória. Fuelberg et al. (1996) durante o experimento Transport and Atmospheric Chemistry Near the Equator-Atlantic (TRACE A), calcularam trajetórias cinemáticas e isentrópicas integrando-as por um período de cinco dias (13-18 de outubro de 1992 utilizando análises do ECMWF). Seus resultados mostraram que as trajetórias calculadas pelo método cinemático, usualmente possuem um deslocamento vertical maior que as correspondentes

isentrópicas. Segundo Fuelberg et al., (1996) ambos os formalismos isentrópico e cinemático podem fornecer trajetórias realistas, na troposfera, com integração de até cinco dias. Por isto, adotamos neste trabalho integrações somente até cinco dias.

Com relação ao tempo as trajetórias podem ser analisadas para frente (“forward”) ou para trás (“backward”). A primeira considera uma parcela inicial no tempo-espaço e acompanha esse deslocamento no sentido positivo do tempo até a sua posição final, ao contrário da segunda que acompanha o deslocamento no sentido negativo do tempo até a posição de origem (Doty e Perkey, 1993). Assim, com o cálculo de trajetórias “forward” podemos inferir para onde uma parcela de ar está se deslocando a partir de um ponto inicial de observação, ao contrário do resultado obtido para o cálculo de trajetórias “backward” que permite inferir qual a procedência das massas de ar que estão chegando num determinado ponto inicial de observação. Neste trabalho manteremos as terminologias em inglês “forward” e “backward” para nos referirmos, respectivamente, às trajetórias para frente e às retro-trajetórias.

3.6.2 Método Utilizado nesse Trabalho para o Cálculo de Trajetórias

“Forward” e “Backward”

Utilizamos cálculos de trajetória isentrópica, de acordo com a técnica apresentada anteriormente e segundo o método desenvolvido pelo especialista em cálculo de trajetórias Dr. Igor Troniskov do CPTEC/INPE. Os parâmetros de entrada: campos de ventos (horizontal e vertical), altura geopotencial, temperatura potencial, níveis de pressão, foram obtidos do National Center for Environmental Prediction – NCEP, cujos arquivos de dados possuem o seguinte formato (NCEP, 1998):

- a) 17 níveis de pressão = (1000; 925; 850; 700; 600; 500; 400; 300; 250; 200; 150; 100; 70; 50; 30; 20 e 10 mbar);
- b) resolução espacial: $2,5^0 \times 2,5^0$ (latitude x longitude);
- c) formato binário.

O método de interpolação utilizado foi o “cubic spline interpolation” (Williamson e Rasch, 1989), (Conte e Boor 1981) que apresenta menos oscilações e melhor relação entre precisão e eficiência computacional (Bermejo e Staniforth, 1992); (Purnell, 1976) e o programa utilizado para a visualização das trajetórias foi o Grid Analysis and Display System - GRADS, que consiste num software proveniente dos Estados Unidos, University of Maryland, Center for Ocean Land-Atmosphere Interactions, Department of Meteorology muito utilizado na área de meteorologia e ciência da terra (Doty, 1995). A Figura 3.11 mostra a rotina utilizada para os cálculos de trajetória “forward” e “backward” pelo método isentrópico adotado.

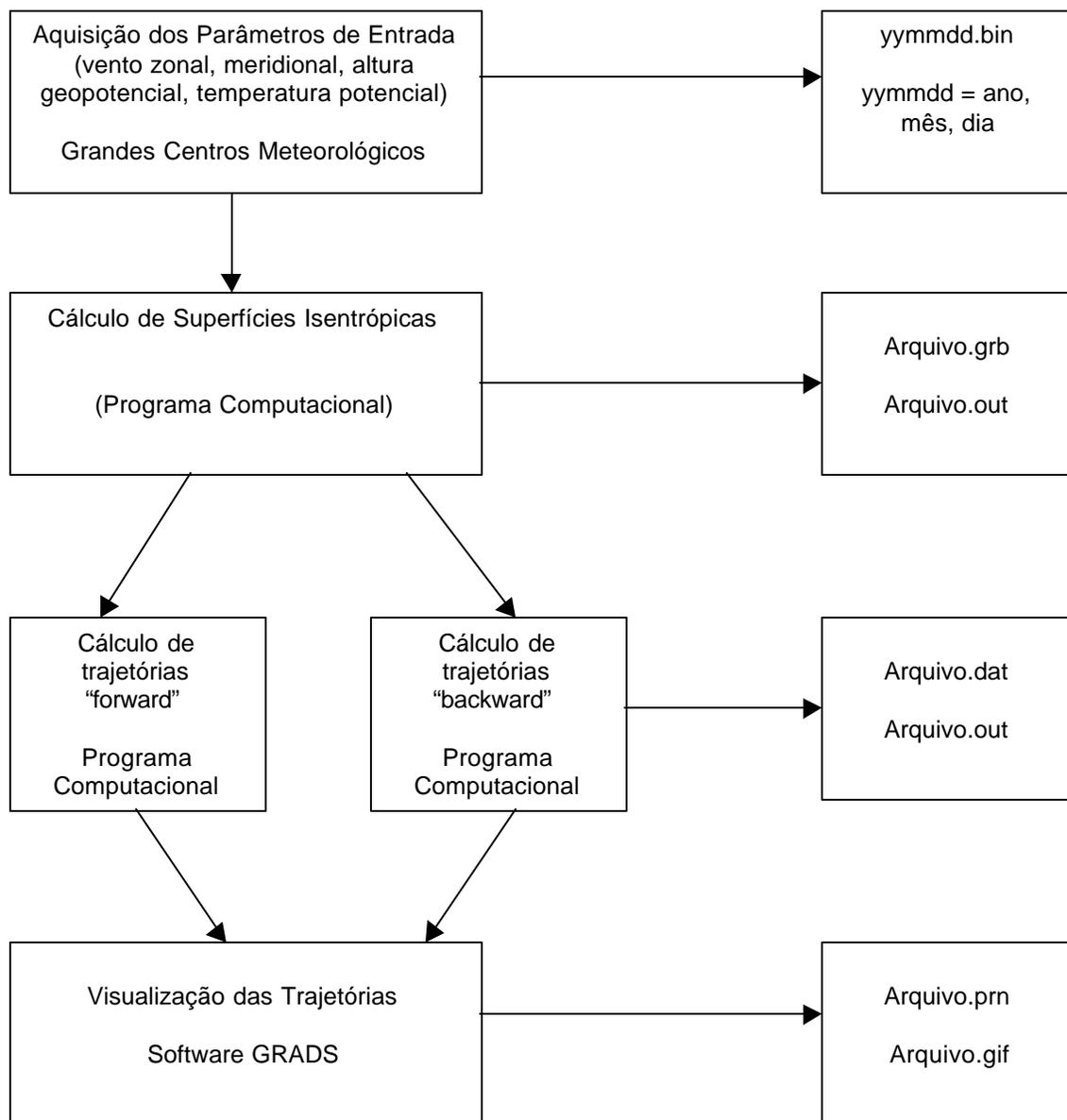


Fig. 3.11 – Esquema da rotina para o cálculo de trajetórias para o modelo isentrópico adotado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Medidas Aéreas de Monóxido de Carbono

4.1.1 Campanha de setembro/1999

No período de 18 a 21 de setembro de 1999 realizamos um voo com o avião Bandeirante/INPE ao longo da área do “corredor de circulação de massas de ar” (determinado por cálculos de trajetórias de massas de ar) onde foram realizadas medidas de monóxido de carbono para uma altitude média de 2,0 km. Objetivamos nessa primeira campanha ter uma idéia do comportamento e distribuição das concentrações de monóxido de carbono ao longo das linhas de fluxo de massas de ar, identificadas por cálculos de trajetória de massas de ar. As medidas foram feitas durante os voos de ida (trajeto Curitiba – Barreiras) e de volta (trajeto Barreiras – Curitiba).

As amostras de CO foram coletadas em garrafas de aço inoxidável próprias para esse fim, para posterior análise, pelo método de cromatografia gasosa, no Laboratório de Ozônio do INPE – São José dos Campos (SP), conforme metodologia descrita no capítulo 3, item 3.1. Ao todo foram coletadas 30 garrafas ao longo da área de estudo.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, as concentrações obtidas ao longo da área de estudo nos trajetos de ida (Curitiba – Barreiras) e de volta

(Barreiras – Curitiba). As siglas utilizadas nas referidas figuras correspondem aos nomes das principais cidades ao longo do trajeto. Assim, temos:

BA = Barreiras (BA);

CB = Cuiabá (MT);

CG = Campo Grande (MS);

CO = Corumbá (MT);

CR = Curitiba (PR);

UM = Umuarama (PR);

PN = Porto Nacional (TO);

PP = Ponta Porã (MS).

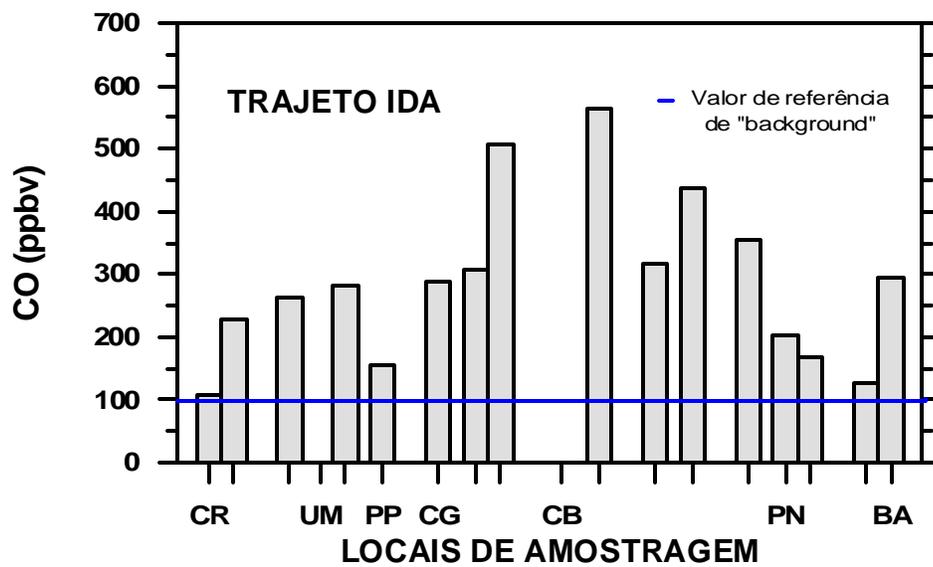
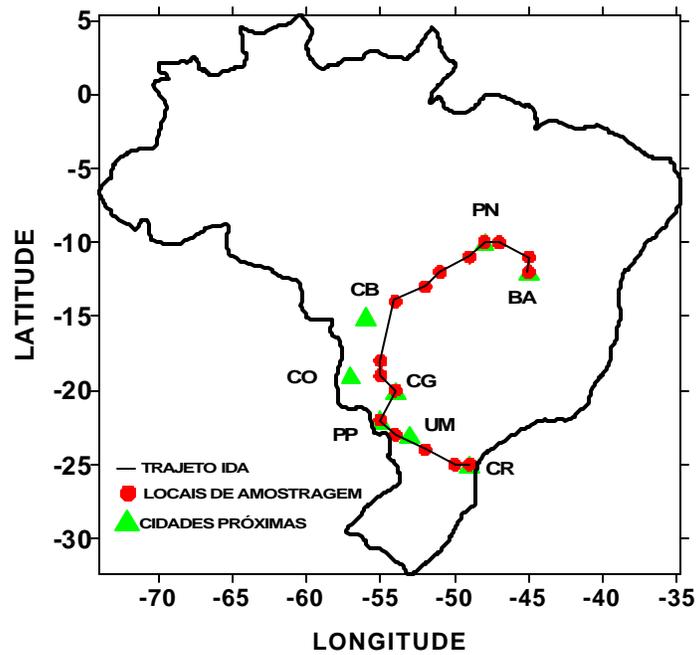


Fig. 4.1 – Trajeto de ida ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações de CO medidas. Vôo com avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999.

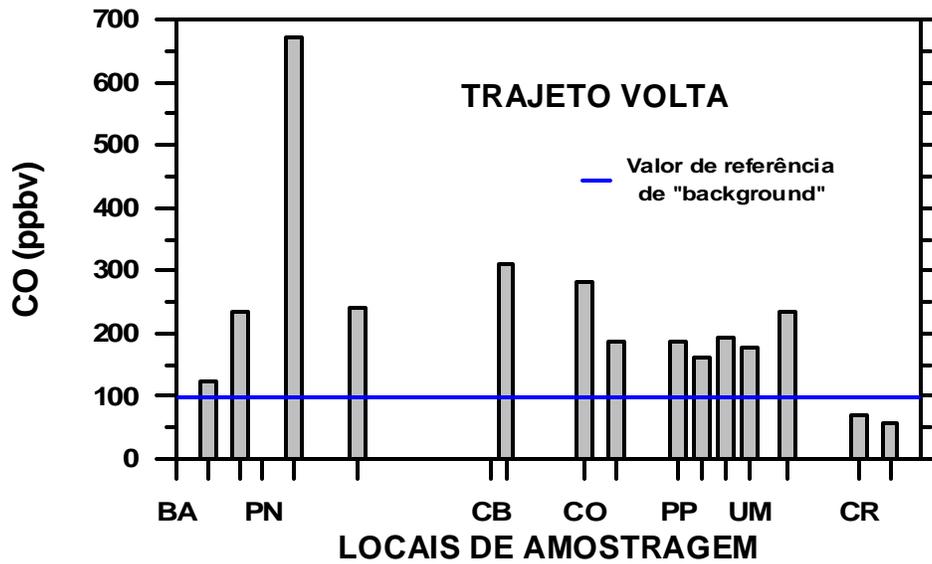
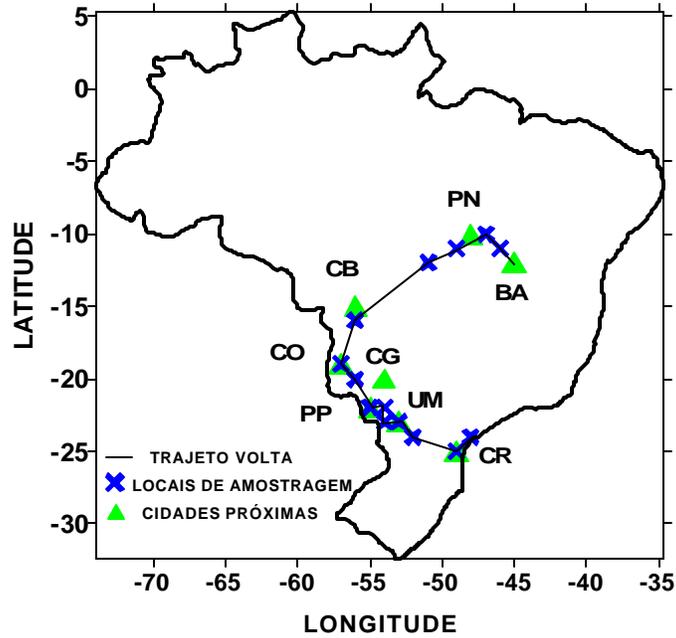


Fig. 4.2 – Trajeto de volta ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações de CO medidas. Vôo com avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999.

Com os resultados obtidos nessa campanha observou-se um gradiente de concentrações de CO, com valores máximos em torno de regiões fonte de queimada (Porto Nacional/TO; Cuiabá/MT) diminuindo gradualmente no sentido de regiões não fonte, evidenciando uma boa relação entre aumentos nas concentrações de CO e números elevados de focos de queimada (dados de satélite). No trajeto de ida um valor máximo de 565,1 ppbv foi registrado na região de Cuiabá (MT) e um mínimo de 109,2 ppbv na região de Curitiba (PR). No trajeto de volta, a concentração máxima medida (672,2 ppbv) foi na região de Porto Nacional (PN) e a mínima de 56,4 ppbv na região de Curitiba (PR). De acordo com experimentos anteriores e dados da literatura as concentrações de “background” ou seja, as concentrações médias de CO para uma região sem poluição estão entre 80 e 100 ppbv (Kirchhoff e Alvalá, 1996), (Sachse et al., 1988).

4.1.2 Campanha de setembro/2000

Realizamos uma segunda campanha aérea no período de 01 a 07 de setembro de 2000, onde foram realizadas medidas das concentrações de monóxido de carbono para uma altitude média de 2,0 km. Objetivamos com essa campanha obter um detalhamento maior da distribuição das concentrações de monóxido de carbono ao longo da área do “corredor de circulação de massas de ar” entre as regiões fonte e não fonte de queimada. Assim, foram feitas medidas do referido gás traço no litoral nordeste (região de entrada das massas de ar no continente) desde Ilhéus (BA) até Maceió (AL), nas regiões fonte de queimada Tocantins (TO), sul do Pará (PA), Mato Grosso (MT) e Mato Grosso do Sul (MS) e nas regiões não fonte de queimada que fazem parte da área do “corredor de circulação de massas de ar”, Paraná (PR) e norte de Santa Catarina (região de Chapecó). Com essas medidas foi possível mapear em termos de concentrações de monóxido de carbono toda a região de abrangência do fluxo típico de massas de ar no continente, desde sua região

de entrada (litoral nordeste) até a de saída (sul do Paraná e/ou norte de Santa Catarina).

Nesta segunda campanha optamos por fazer amostras em duplicata e simultânea em cada ponto de medida com a finalidade de garantirmos uma maior confiabilidade nos resultados. Assim foram coletadas 52 amostras (para posterior análise pelo método de cromatografia gasosa já descrito) em 26 pontos de medidas distribuídos ao longo da área de estudo, conforme mostra a Figura 4.3. O vôo foi realizado no mesmo sentido das linhas de fluxo de ar (Ilhéus – Curitiba) e a distribuição dos pontos de medida foi previamente definida de forma a cobrir por completo a região de fluxo de massas de ar no continente. As siglas mostradas nessa figura correspondem ao nome das cidades ao longo do trajeto. Assim, temos:

IL = Ilhéus (BA);

FS = Feira de Santana (BA);

MA = Maceió (AL);

PE = Petrolina (PE);

PN = Porto Nacional (TO);

CA = Conceição do Araguaia (PA);

AF = Alta Floresta (MT);

VI = Vilhena (RO);

BG = Barra do Garças (MT);

CB = Cuiabá (CB);

CO = Corumbá (MS);

PP = Ponta Porã (MS)

CG = Campo Grande (MS);

MG = Maringá (PR);

CH = Chapecó (SC);

CR = Curitiba (PR).

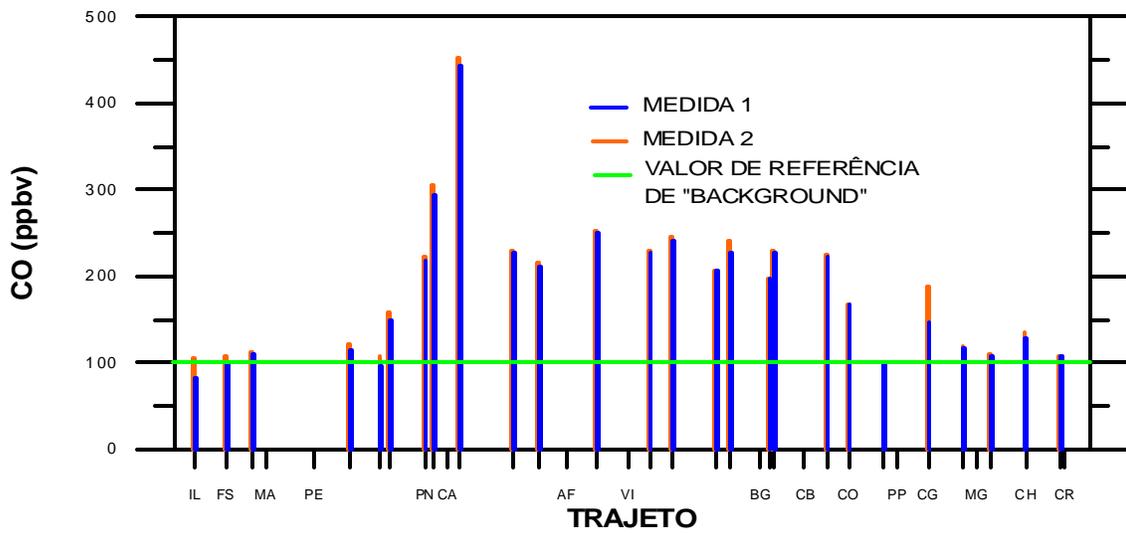
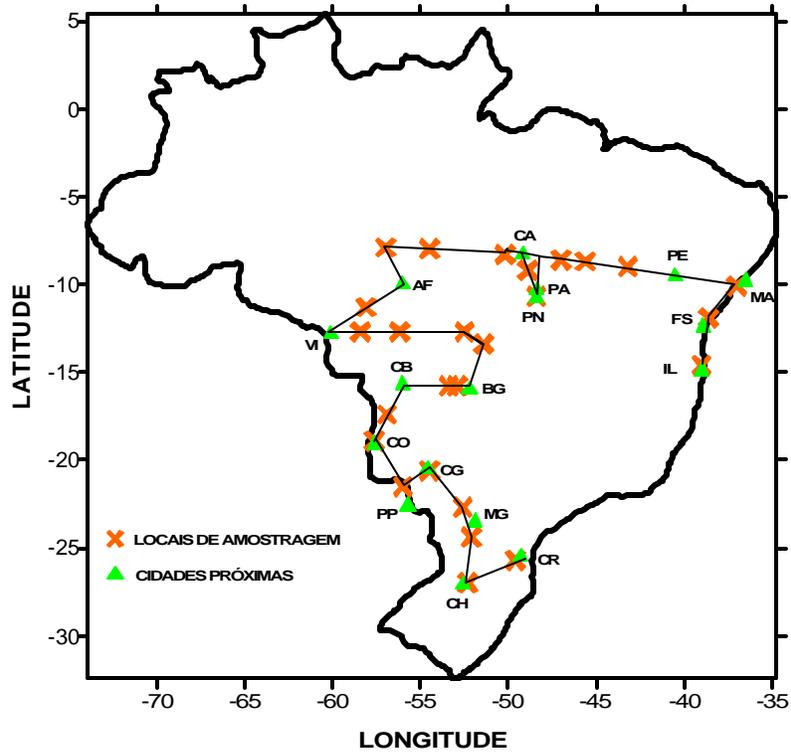


Fig. 4.3 – Trajeto ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações de CO medidas. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 01 a 07/09/2000.

De forma similar aos resultados obtidos na primeira campanha (setembro/1999) foi possível à identificação de um gradiente de concentração das regiões fonte de queimada para as não fonte. Uma concentração máxima de 453,3 ppbv foi medida na região de Conceição do Araguaia (PA). Com base no mapa dos focos de queimada para o período da campanha, mostrado na Figura 4.4 podemos perceber que essa região apresentava nesse período uma alta densidade de focos de queimada, sendo, portanto, uma região fonte de queimada bastante significativa, juntamente com a região do Estado do Tocantins (TO), onde as medidas realizadas indicaram também valores elevados de CO.

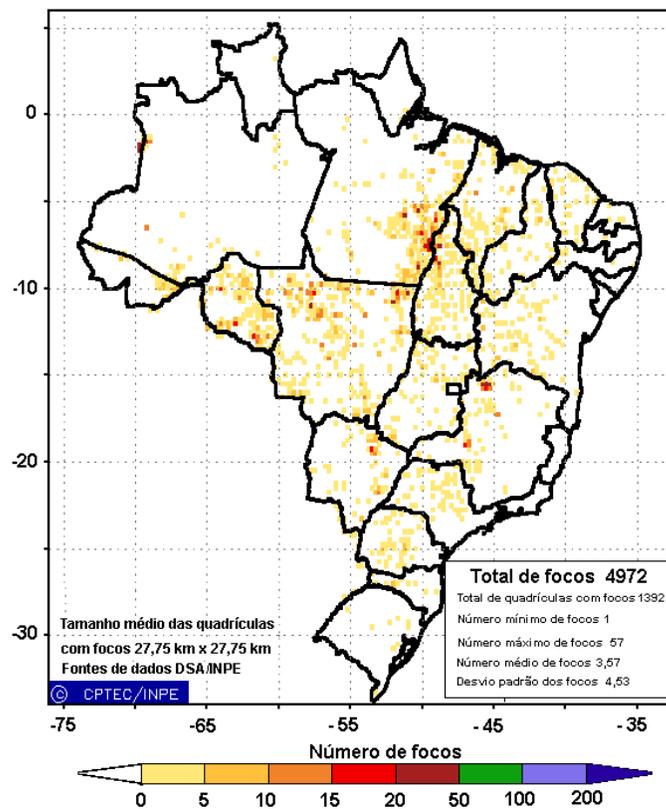


Fig. 4.4 – Focos de queimada registrados pelo satélite NOAA 12 no período de 01 a 07/09/2000.

As concentrações de CO medidas no litoral nordeste do Brasil apresentaram valores compatíveis com os de "background", sendo registrado um valor mínimo de 83,1 ppbv em Ilhéus (BA).

4.2 Outros Gases Medidos

Na primeira campanha realizada em setembro/1999, além do monóxido de carbono medimos também ozônio que é produzido indiretamente pela queima de biomassa, através de processos fotoquímicos.

As medidas de ozônio foram realizadas usando-se um analisador de ozônio modelo 8810 da marca Labs, cujo princípio de funcionamento baseia-se na metodologia descrita no capítulo 3, item 3.2 e fornece medidas contínuas de ozônio. Nesse experimento os dados foram enviados para um registrador de papel, para posterior análise dos resultados.

O ozônio mostrou um panorama similar ao do CO, com uma defasagem espacial (isto é, o máximo foi observado depois do máximo do CO), o que interpretamos como sendo correspondente ao tempo necessário para que ocorram as reações químicas que o produzem a partir do CO. Sua concentração puntual variou desde 30 ppbv (valor baixo) nas regiões não-fonte até valores de 65 ppbv (valores já elevados, mas não muito; já foram observados valores muito mais altos em outros experimentos realizados no cerrado). Acreditamos que devido à presença de nebulosidade na região, as condições de iluminação com radiação UV, necessárias nas reações, não foram adequadas para produzirem grandes quantidades de ozônio, (neste voo em particular). As Figuras A1 e A2, Apêndice A mostram as concentrações médias de O₃/trecho para os vôos de ida e volta, respectivamente.

Na segunda campanha foram feitas medidas de ozônio e dióxido de carbono. Analogamente à campanha anterior as concentrações de ozônio foram medidas utilizando um analisador de ozônio modelo 8810 da marca Labs

(princípio de funcionamento descrito anteriormente) que fornece medidas contínuas de ozônio. Nessa campanha os dados foram registrados num “data logger” (registrador automático) e posteriormente descarregados num microcomputador para análise.

O mapa da Figura A3, Apêndice A mostra os pontos de referência (letras de A até BD) utilizados para o cálculo das médias de O_3 /trecho mostradas no gráfico da mesma figura. As concentrações médias de O_3 /trecho variaram de 30,2 ppbv (região de Maceió) até 54,3 ppbv (região de Vilhena), valores não tão altos quando comparados com dados de experimentos anteriores que mostram concentrações superiores a 80 ppbv no cerrado (período de seca). Acreditamos que assim como na campanha anterior a presença de nebulosidade na região não tenha fornecido as condições necessárias para a formação de ozônio em grandes quantidades, uma vez que o ozônio depende da radiação ultravioleta para que os processos fotoquímicos necessários à sua formação ocorram.

As medidas de dióxido de carbono foram feitas com um analisador de CO_2 LI-6252 da marca LI-COR que fornece medidas contínuas em ppmv (partes por milhão por volume). O princípio de funcionamento deste equipamento foi previamente descrito no capítulo 3, item 3.3. Esses dados também foram registrados num “data logger” (registrador automático) e posteriormente descarregados num microcomputador para análise.

Os pontos de referência para o cálculo da média de CO_2 /trecho correspondem aos mesmos adotados para o O_3 , conforme mostra o mapa da Figura A4, Apêndice A.

No gráfico da mesma figura apresentamos os valores médios de CO_2 /trecho, os valores médios máximos registrados por trecho foram de 387,3 ppmv na região de Palmas (TO) e de 383,0 ppmv na de Barra do Garças (MT).

Com os resultados obtidos em duas campanhas (anos de 1999 e 2000), em que foram feitas medidas de gases traço de queimada, constatamos que o

monóxido de carbono por ser um produto imediato da queima de biomassa, que independe de processos fotoquímicos como o ozônio e de biológicos como o caso do dióxido de carbono, corresponde a um excelente traçador no mapeamento da distribuição de contaminantes de queimada à partir da região fonte e nos estudos de transporte de contaminante. Assim, no modelo (apresentado a seguir) desenvolvido para a determinação do termo de transporte de contaminantes, entre regiões fonte e não fonte de queimada, utilizaremos o monóxido de carbono como traçador, que de acordo com discussão prévia, corresponde a um dos resultantes imediatos da queima de biomassa e também possui um tempo médio de vida na troposfera de cerca de dois meses (Novelli et al., 1988). No contexto desta análise, portanto, pode ser considerado um bom traçador.

4.3 Modelo para o Cálculo do Termo de Transporte

A metodologia desenvolvida apresenta uma abordagem teórica experimental, uma vez que objetiva estimar o termo de transporte de monóxido de carbono, trazidos de regiões fonte para não fonte, a partir de um formalismo matemático, baseado na equação da continuidade e de dados obtidos experimentalmente (medidas aéreas da concentração total de monóxido de carbono e dados de satélite de focos de queimada).

A fim de simplificar a análise da área de estudo, mostrada na Figura 2.5, gradeamos a região do “corredor de circulação de massas de ar” no Brasil em subáreas de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, a qual denominamos células A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M e N (Figura 4.5).

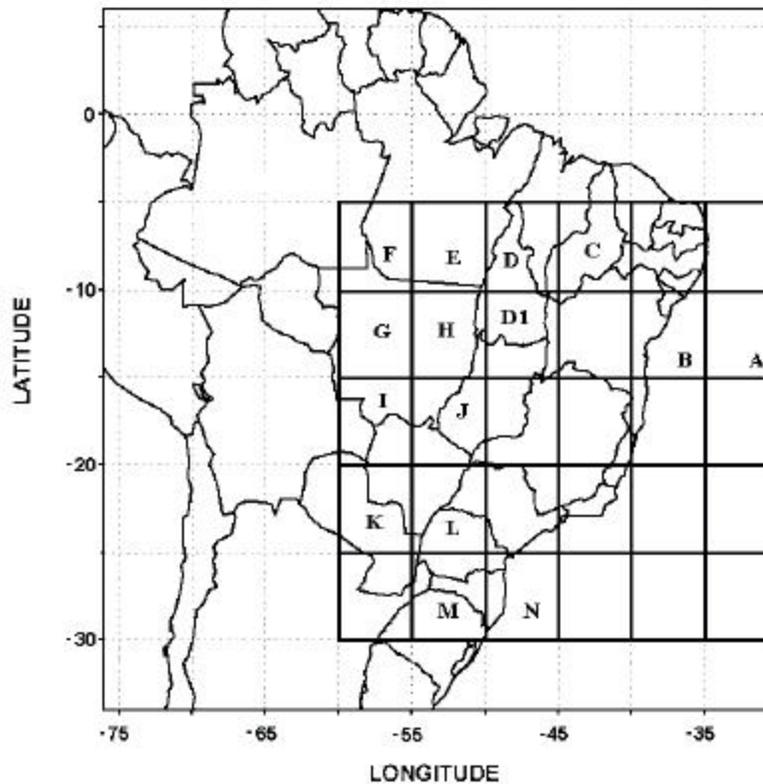


Fig. 4.5 – Mapa do Brasil com a subdivisão da área do “corredor de circulação de massas de ar” em células de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, designadas pelas letras de A até N.

Alguns fatores importantes que devem garantir a eficiência da metodologia desenvolvida para a análise dos termos de transporte são: o fato do gás traço (monóxido de carbono) utilizado para esse estudo ser o resultado imediato da queima incompleta de biomassa e ter vida média longa (Novelli et al, 1998), o que nos possibilita desconsiderar em nossa análise o termo de perda da equação da continuidade; o padrão de circulação climática de inverno da área de estudo que define um "corredor de circulação de massas de ar", garantindo que haja um fluxo de massas de ar contínuo entre regiões fonte e não fonte de queimada, no período de queima de biomassa e o regime de larga subsidência que favorece a ocorrência de queimadas no Brasil Central e, portanto a manutenção das fontes produtoras poluentes.

Com base nos princípios da continuidade, determinamos a equação básica a ser aplicada em cada célula para a determinação do termo de transporte. Conforme pode ser demonstrado, a concentração total de um dado poluente (em nosso estudo o CO) medida num ponto (ou célula) é devido à contribuição de três termos: “background” (ou residual), produção regional e de transporte (isto é, a parte que vem de outras regiões). Assim, temos:

$$C_m = C_b + C_r + C_t \quad (4.1)$$

Onde:

C_m = Concentração medida;

C_b = Concentração de “background” ou residual;

C_r = Concentração regional;

C_t = Concentração de transporte (o que vem importado de outras regiões).

As concentrações medidas (C_m) correspondem às medições aéreas feitas neste projeto, com o auxílio do avião Bandeirante/INPE, ao longo do corredor de circulação de massas de ar para altitudes entre 2,0 e 2,5 km. Nesta faixa de altitude, nossa experiência (experimentos anteriores) mostra que as razões de mistura dos constituintes são relativamente constantes (Kirchhoff e Alvalá, 1996). O uso de avião possibilita a obtenção, praticamente simultânea, de concentrações de contaminantes ao longo da área de estudo, sendo que esses valores medidos correspondem à concentração total de contaminantes num dado ponto. Mesmo supondo que num dado local não haja produção nenhuma de contaminantes e que não estejam sendo transportado contaminantes de outras regiões, existe uma concentração mínima denominada de “background” (ou residual), como indicado na Figura 4.6. Em nosso estudo o termo de “background” corresponde a um valor médio de concentrações mínimas observadas durante a ausência de queima de biomassa (período de chuvas).

De acordo com experimentos anteriores e dados da literatura, concentrações médias de monóxido de carbono entre 80 a 100 ppbv são valores médios típicos de “background” (Kirchhoff e Alvalá, 1996), (Sachse et al., 1988).

A Figura 4.6 mostra o esquema básico de nossa simulação de variação anual dos contaminantes de queimada. A curva mostra um valor medido genérico de concentração, C_m , representado para o mês de máximo setembro. A curva senoidal representa a variação temporal da contribuição regional (mas o valor de fato é o observado pelo sensor a bordo do satélite); o valor de base representa C_b e o termo de transporte (incógnita procurada) está representado por C_t . Nota-se que no limite inferior, quando a contribuição regional é nula, e o transporte também, o valor de C_m se confunde com o de C_b .

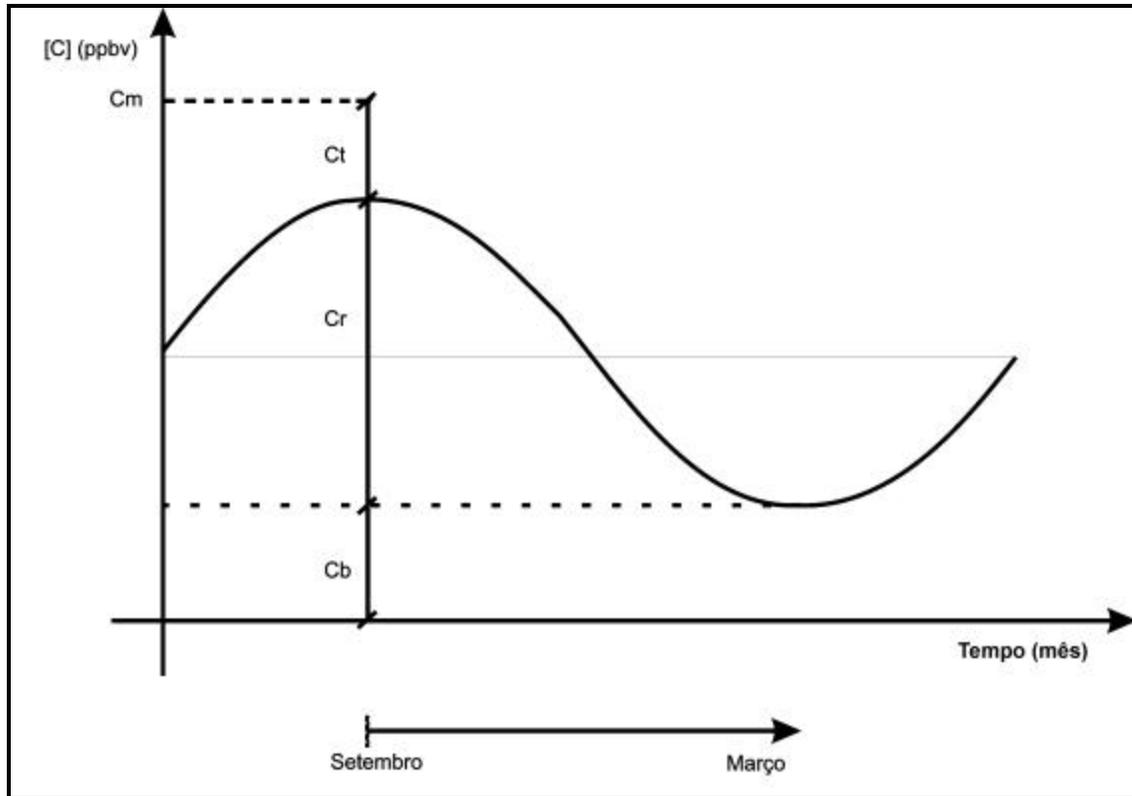


Fig. 4.6 – Diagrama esquemático da variação temporal da contribuição regional (C_r) e definição dos termos C_m , C_b e C_t .

Define-se o termo de contribuição regional, por exemplo, para o mês de setembro, como sendo:

$$C_r = 2.F.N \quad (4.2)$$

Onde:

C_r = contribuição regional;

N = número de focos de queimada por célula;

F = Fator de conversão, dimensional, de focos de queimada para concentração de CO (ppbv).

Com base nas considerações apresentadas, elaboramos um programa computacional, em linguagem de programação QBASIC (Apêndice B), para o cálculo do termo de transporte, a partir dos parâmetros de entrada C_m , C_b , N e F . Inicialmente fizemos uma validação numérica do modelo, que descreveremos a seguir, a fim de testarmos a convergência do formalismo desenvolvido para o cálculo do termo de transporte (C_t).

4.3.1 Validação Numérica da Metodologia Desenvolvida para o Cálculo do Termo de Transporte

Assim, utilizando os valores medidos (concentrações de monóxido de carbono e dados de focos de queimada) e por meio do programa computacional desenvolvido testamos, inicialmente, a eficiência da metodologia desenvolvida para o cálculo do termo de transporte, variando os parâmetros de entrada dentro de uma certa lógica. Objetivamos com isso testar a sensibilidade do programa em função da variação dos parâmetros de entrada. Assim, consideramos algumas suposições:

Três casos de condições de contorno para a célula D1 são apresentados onde variamos por hipótese o valor do termo de transporte inicial, na primeira região (célula D1 da Figura 4.5 = região de Tocantins), por onde passam as massas de ar. Assim, temos os seguintes desdobramentos:

Hipótese 1) $C_{tD1} = 0$ (supondo que as massas de ar vindas do Oceano Atlântico estão isentas de contaminação, portanto inicialmente não transportam contaminantes para a primeira célula);

Hipótese 2) $C_{tD1} = 25$ ppbv (supondo que as massas de ar vindas do Oceano Atlântico transportam uma pequena concentração de contaminantes para a primeira célula);

Hipótese 3) $C_{tD1} = 50$ ppbv (supondo que as massas de ar vindas do Oceano Atlântico transportam uma concentração significativa de contaminantes

para a primeira célula). Os gráficos comparativos entre os termos de transporte por célula para as diferentes hipóteses são apresentados na Figura 4.7, onde os três painéis representam as três condições de teste:

$$C_b = 100 \text{ ppbv};$$

$$C_b = 80 \text{ ppbv};$$

$$C_b = 60 \text{ ppbv}.$$

As ordenadas na Figura 4.7 mostram os valores de concentração oriundos do transporte de contaminantes (resultado das hipóteses assumidas) e no eixo das abcissas mostramos os três casos de condições iniciais da célula D1.

Verificamos na Figura 4.7 que os valores calculados não variam muito, mesmo com a variação grande imposta na condição básica que é o valor de C_b (entre 60 e 100). Além disto, os resultados (as três barras) também não variam muito com a variação de C_{tD1} , que variou de um fator muito grande (de 0 a 50).

Com base nessa validação numérica do modelo, concluímos que o formalismo desenvolvido possibilita a determinação do termo de transporte/célula, uma vez que os resultados são convergentes, isto é, mesmo variando bastante as condições de entrada do sistema de cálculo, os resultados não variam muito.

A partir destas condições de contorno definidas para a célula D1 (C_{tD1} variando de 0 a 50 ppbv) e para N (número de focos de queimada) correspondente ao mês de setembro, obteve-se um valor médio de $F=0,9 \pm 0,2$ ppbv de CO por 100 focos (fator de conversão de focos de queimada para concentrações de CO em ppbv).

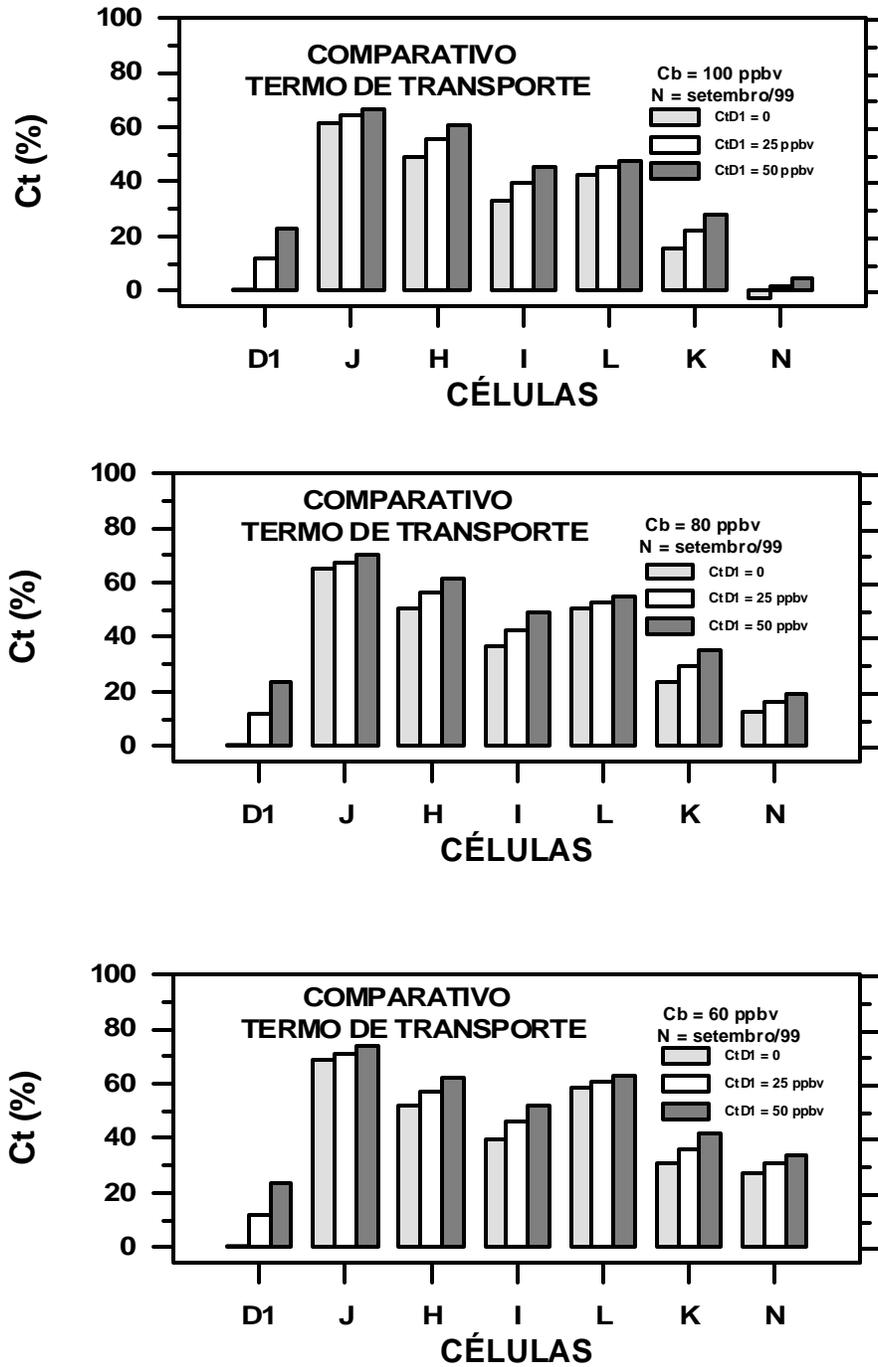


Figura 4.7 – Comparativo entre os termos de transporte para diferentes parâmetros de entrada considerando os focos mensal de queimada/célula do mês de setembro e Cb = 100, 80 e 60 ppbv, respectivamente.

4.3.2 Cálculo do Termo de Transporte para os Dados da Campanha de setembro/1999

Com base nas conclusões obtidas no processo de validação da metodologia desenvolvida, os cálculos do termo de transporte foram feitos utilizando-se:

$C_b = 100$ ppbv para todas as células;

N = número de focos de queimada correspondente ao período da campanha e impondo-se como condição de contorno para célula D1 que $C_{tD1} = 0$ (termo de transporte em D1), pois as massas de ar que chegam à região D1 provêm de regiões isenta de contaminação (litoral nordeste do Brasil).

A Figura 4.8 mostra os resultados obtidos para os dados da campanha de 1999. As células que apresentaram um termo de transporte mais significativo foram as células J e H (53% e 39%, respectivamente), que correspondem às células vizinhas a grande região produtora para o período D1. Podemos observar nessa figura que para a região L, por exemplo, que não é uma região fonte de queimada, 25% da concentração total medida de CO é devido ao transporte.

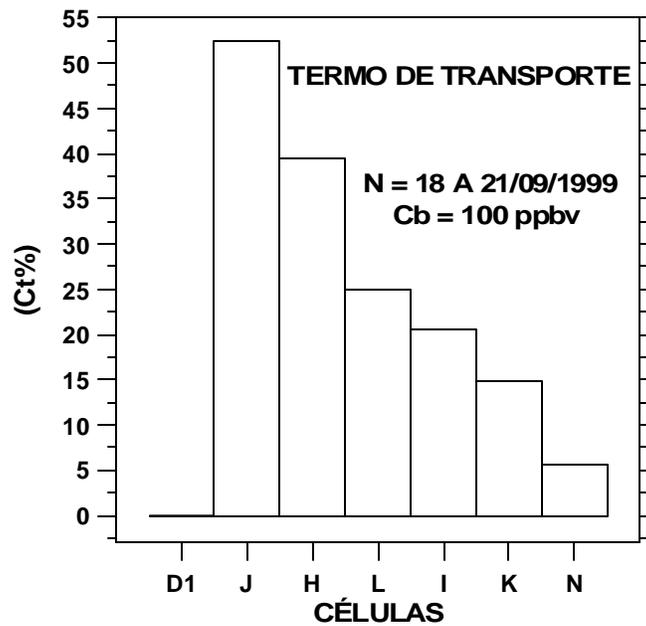
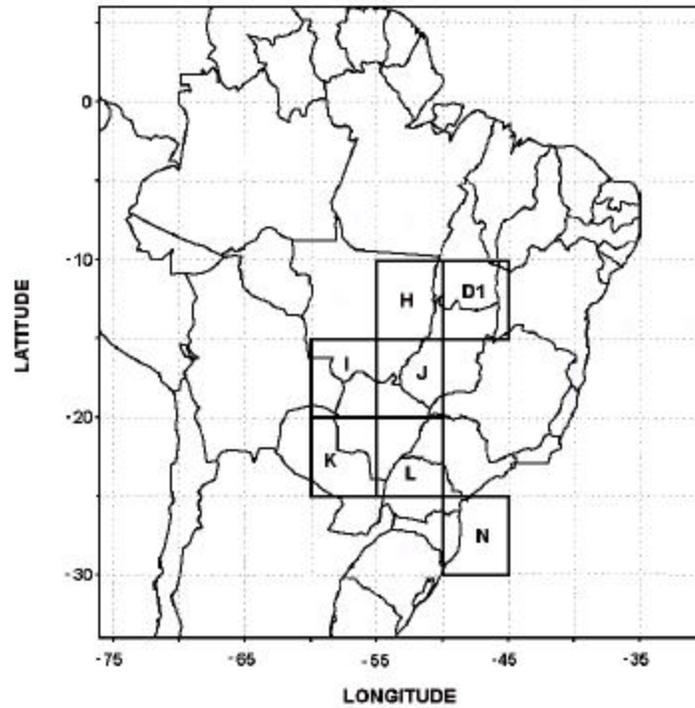


Fig. 4.8 – Cálculo do termo de transporte para os dados da campanha de setembro/1999.

Refizemos os cálculos do termo de transporte/célula utilizando um valor médio dos focos de queimada para os meses de julho, agosto e setembro, a fim de termos uma idéia do comportamento médio do transporte durante os meses de pico de queimada (a Figura 4.9 mostra esse resultado). Apesar de ser um valor médio obtivemos resultados semelhantes aos quando usamos valores mais precisos de N.

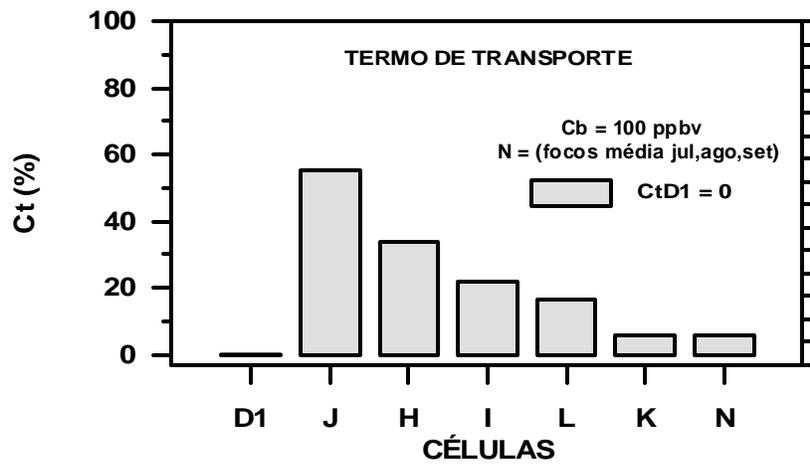
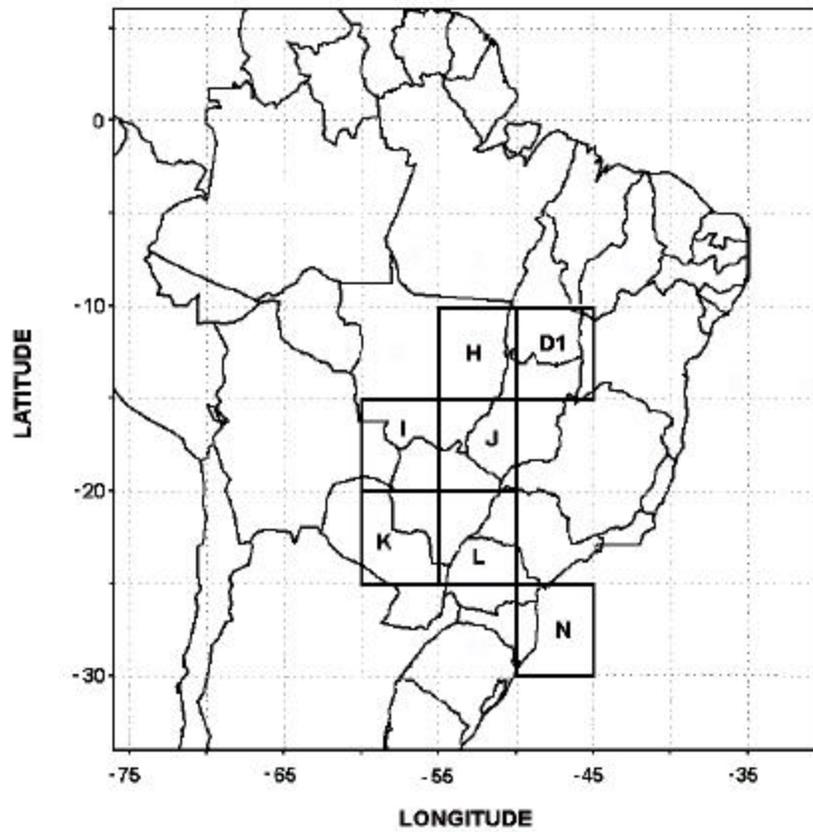


Fig. 4.9 – Cálculo do termo de transporte para $N =$ média julho, agosto e setembro/1999.

4.3.3 Cálculo do Termo de Transporte para os Dados da Campanha de setembro/2000

A Figura 4.4 mostra os focos de queimada registrados pelo satélite NOAA 12 durante o período da campanha. De acordo com esses dados a região do Tocantins, Mato Grosso e a divisa dos estados de Tocantins e Pará corresponderam às áreas de maior densidade de focos de queimada para o período de 01 a 07/09/2000.

Com base nesses dados e nas concentrações de monóxido de carbono medidas ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” (ver Figura 4.3) determinamos o termo de transporte para cada célula. A Figura 4.10 mostra os resultados obtidos.

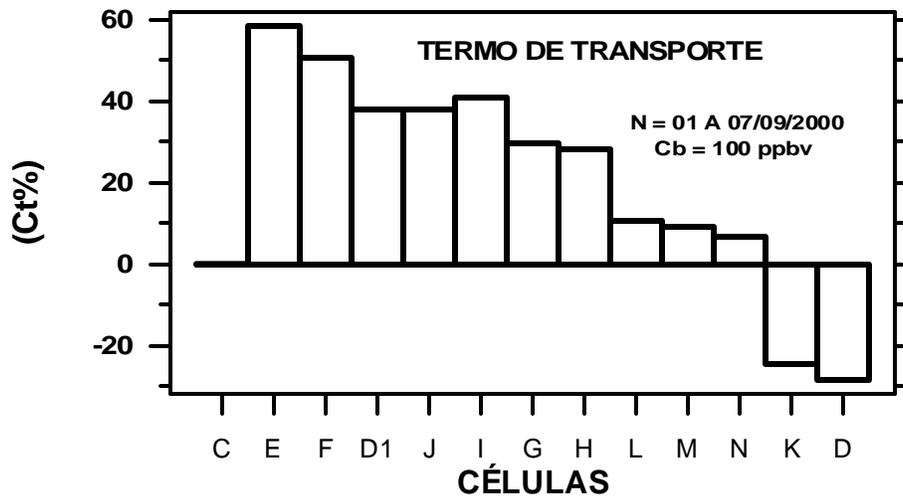
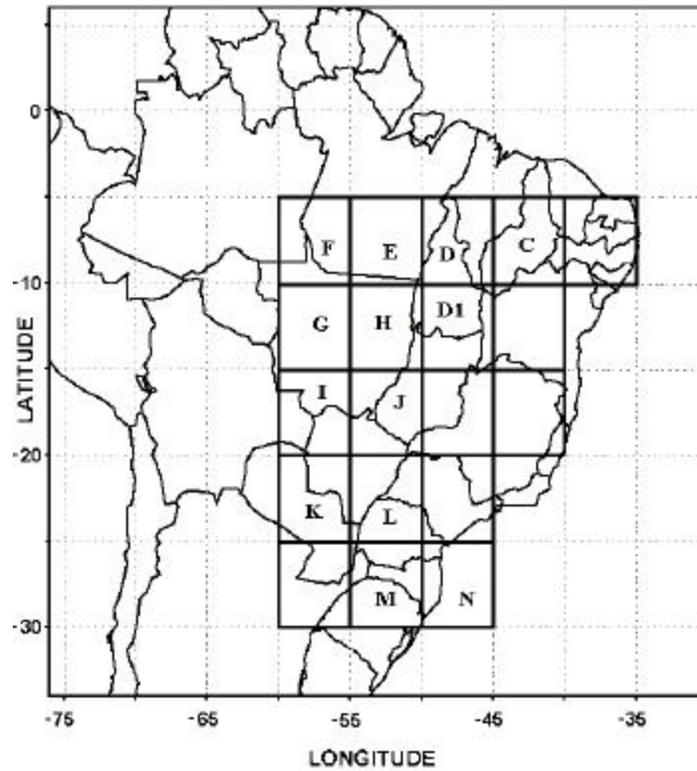


Fig. 4.10 – Cálculo do termo de transporte/célula para os dados da campanha de setembro/2000.

Neste ano, em especial, observou-se no continente brasileiro, durante o período típico de seca no Brasil Central (julho a setembro), a entrada de um número superior à média de sistemas frontais, o que ocasionou chuvas isoladas, aumento de nebulosidade em regiões onde tipicamente temos estiagem nesse período (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul) e também uma diminuição no número de focos de queimada com relação aos anos anteriores. Apesar dessas variações climatológicas, houve uma contribuição significativa do termo de transporte para a maioria das células, conforme mostra a Figura 4.10.

De acordo com os resultados obtidos com os cálculos do termo de transporte, as células que apresentaram o maior termo de transporte foram às células E (59%) e F (51%). Essas células localizam-se nas vizinhanças da célula D (região de Tocantins), que de acordo com os dados de focos de queimada/célula do satélite NOAA 12, corresponde à célula fonte de queimada mais significativa para o período, apresentando uma densidade elevada de focos de queimada. Assim acreditamos que a alta contribuição do termo de transporte nas células E e F, seja devido ao transporte de contaminantes provenientes da região fonte de queimada (célula D), resultados semelhantes foram obtidos para os dados da campanha de 1999, em que as células que apresentaram o maior termo de transporte foram a J (53%) e a H (39%) que correspondem às células vizinhas à fonte de queimada mais significativa (célula D1) para o período. As células D e K apresentaram um transporte negativo, o que significa dizer que nessas células a quantidade de CO exportada foi muito mais significativa que o que elas importaram de outras regiões. A célula D, por exemplo, correspondeu a célula fonte de queimada, mais significativa para o período.

Mesmo nas regiões não fonte de queimada como as células L, M e N foi possível através do modelo desenvolvido identificar concentrações de CO

devido ao transporte. As concentrações devidas ao transporte (C_t) para as células L, M e N foram, respectivamente, iguais à: 11%; 9% e 7%.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O objetivo geral desse trabalho foi realizar medidas de gases traço de queimada ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” no continente brasileiro e quantificar em termos de concentrações de monóxido de carbono CO, a influência das queimadas realizadas no Brasil Central sobre regiões de baixos índices de queima de biomassa.

Os objetivos específicos foram: realizar cálculos de trajetórias para determinar o caminho de transporte continental de massas de ar na troposfera, em altitudes definidas; utilizar os dados dos satélites da série NOAA para avaliar a distribuição espacial e temporal dos focos de queimada; realizar medidas aéreas de monóxido de carbono ao longo da área de estudo (“corredor de circulação de massas de ar” no Brasil) a fim de estudar o transporte de contaminantes de áreas fonte para não fonte de queimada; desenvolver uma metodologia para estimar o termo de transporte de contaminantes (ao longo do “corredor de circulação de massas de ar”) de regiões fonte de queimada para não fonte, com base nas medidas aéreas de monóxido de carbono e dos dados de focos de queimada dos satélites da série NOAA e determinar as concentrações de monóxido de carbono, provenientes de áreas fonte de queimada, que são transportadas para áreas não fonte.

Como base nos objetivos do trabalho, realizou-se duas campanhas aéreas com avião Bandeirante do INPE nos anos de 1999 e 2000 (mês de setembro), onde foram feitas medidas de monóxido de carbono, ozônio e dióxido de carbono. Com essas duas campanhas identificamos um gradiente de concentrações de CO, das áreas fonte de queimada para as não fonte, o que nos possibilitou concluir que realmente o monóxido de carbono por ser um produto imediato da queima de biomassa, que independe de processos fotoquímicos como o ozônio

e de processos biológicos como o caso do dióxido de carbono, corresponde a um excelente traçador no mapeamento da distribuição de contaminantes de queimada, à partir de regiões fonte e nos estudos de transporte de contaminantes.

A metodologia desenvolvida para a determinação do termo de transporte/célula mostrou-se eficiente, sendo possível, para o período da campanha, a identificação de percentuais elevados de CO devido ao transporte nas regiões não fonte de queimada:

25% (primeira campanha) e 11% (segunda campanha) na célula L (região do Paraná);

9% na célula M (região de Chapecó);

7% (primeira campanha) e 6 % (segunda campanha) na célula N (região de Curitiba);

percentuais de até 59% nas áreas vizinhas às grandes fontes de queimada (regiões do Pará);

Para o mês crítico de setembro (cálculos considerando o total de focos de queimada mensal) temos percentuais de 45% na célula L e 70% na célula J (região de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul).

Com base nos resultados obtidos seria interessante como um trabalho futuro, a realização de um monitoramento das concentrações de gases traço de queimada nas células J (região fonte de queimada) e L (região não fonte de queimada), que se localizam na saída do “corredor de circulação de massas de ar”, por onde escoam o fluxo de contaminantes provenientes das queimadas realizadas no Brasil Central, a fim de detalhar a interação entre regiões fonte de queimada e não fonte ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” no continente brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvalá, P.C.; Kirchhoff, V. W. J. H. Observations of atmospheric methane and carbon monoxide in Brazil: SCAR B mission. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 32101-32105, Dec. 1998.
- Anderson, B. E. G. L.; Barrick, G., J. D. W.; Collins, J. E.; Sachse, G. W.; Hudgins, C. H.; Bradshaw, J. D.; Sandholm, S. T. Factors influencing dry season ozone distributions over the tropical South Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D12, p. 23491-23500, Dec. 1993.
- Andreae, M. O.; Browell, E. V.; Garstang, M., Gregory, G. L.; Harriss, R.C.; Hill, G. F.; Jacob, D. J.; Pereira, M. C.; Sachse, G. W.; Setzer, A. W.; Dias, P. L. S.; Talbot, R. W.; Torres, A. L.; Wofsy, S. C. Biomass burning emissions and associated haze layers over Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n.D2, Feb. 1988.
- Andreae, M. O.; Chapuis, A.; Cros, B.; Helas, J. F. G.; Justice, C.; Kaufman, Y. J.; Minga, A.; Nganga, D. Ozone and Aitken nuclei over equatorial Africa: Airborne observations during DECAFE 88. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D6, p. 6137-6148, Apr. 1992.
- Andreae, M. O.; Anderson, B. E.; Blake, D. R.; Bradshaw, J. D.; Collins, J. E.; Gregory, G. L.; Sachse, G. W.; Shipman, M. C. Influence of plumes from biomass burning on atmospheric chemistry over the equatorial and tropical South Atlantic during CITE 3. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D6, p. 12793-12808, June 1994.
- Artaxo, P. E.; Fernandes, E. T.; Martins, J. V.; Yamasoe, M. A.; Hobbs, P. V.; Maenhaut, W.; Longo, K. M.; Castanho, A. Large-scale aerosol source apportionment in Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 31837-31847, Dec. 1998.

- Austin, J.; Tuck, A.F. The calculation of stratospheric air parcel trajectories using satellite data. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 111, n. 468, p. 279-307, Apr. 1985.
- Barnola, J. M.; Raynoud, D.; Neftew, A.; Oeschger, H. Comparison of CO₂ measurements by two laboratories on air from bubbles in polar ice. **Nature**, v. 303, n. 5910, p. 410 – 413, 1983.
- Bermejo, R.; Staniforth, A. The Conversion of Semi-Lagrangian Advection Schemes to Quasi-Monotone Schemes. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 11, p. 2622-2632, Nov. 1992.
- Blair, T. A. Meteorologia. Rio de Janeiro: Aliança para o Progresso, 406p., 1964.
- Browell, E. V.; Gregory, G. L.; Harris, R. C.; Kirchhoff, V. W. J. H. Tropospheric ozone and aerosol distributions across the Amazon basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. D2, p.1431-1451, Feb. 1988.
- Cavalcanti, I. F. de A. Sistemas frontais. In: IV Curso de Interpretação de Imagens e Análise Meteorológica, São José dos Campos, 19 - 25 de out. de 1995. **Curso de Extensão Universitária - UNIVAP**.
- Conte, S. D.; Boor C. de. **Elementary numerical analysis – An algorithmic approach**. London: McGraw-Hill ,1981. 432p.
- Coutinho, L.M. Fire in the ecology of the brazilian cerrado. In: Goldammer J.G. ed. **Fire in the tropical biota (Ecosystem processes and global challenges)**. Springer- Verlag Berlin Heidelberg: Germany , 1990. p. 82-105.
- Cros, B.; Delmas, R.; Clairac, B.; Loemba-Ndembi, J. Survey of ozone concentrations in the equatorial region during the rainy season. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. D8, p. 9772-9778, Aug. 1987.

- Cros, B.; Delmas, R.; Nganga, D.; B. Clairac. Seasonal trends of ozone in equatorial Africa: Experiment evidence of photochemical formation. **Journal of Geophysical Research**, v.93, n. D7, p.8355-8366,1988.
- Crutzen, P. J.; Leroy, E. H.; Krasnec, J. P.; Pollock, W. H.; Seiler, W. Biomass burning as source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl and COS. **Nature**, v. 282, n.15, p. 253-256, Nov. 1979.
- Crutzen, P. J.; Andreae, M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, n. 250, p. 1669-1678, Dec. 1990.
- Crutzen, P. J.; Delany, A. C.; Greenberg, J.; Haagenson, P.; Heidt, L.; Lueb, R.; Pollock, W.; Seiler, W.; Wartburg, A. and Zimmerman, P. Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. **Journal of Atmospheric Chemistry**, n.2, p. 233-256, 1985.
- Doty, K. G.; Perkey, D. J. Sensitivity of trajectory calculations to the temporal frequency of wind data. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 2, p. 387-401, Feb. 1993.
- Fan, S. M.; Wofsy, S. C.; Bakwin, P. S.; Jacob, D. J.; Fitzjarrald, D. R. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon Forest. **Journal of Geophysical Research**, v.95, n. D10, p. 16851 – 16864, Sep. 1990.
- Fishman, J.; Seiler, W. Correlative nature of ozone and carbon monoxide in the troposphere: Implications for the tropospheric ozone budget. **Journal of Geophysical Research**, v.88, n.C6, p. 3662-3670, Apr. 1983.
- Fuelberg, H. E.; Loring R. O. Jr.; Watson, M. V.; Sinha, M. C.; Pickering, K. E.; Thompson, A. M.; Sachse, G. W.; Blake, D. R.; Schoeberl, M. R. TRACE A trajectory intercomparison 2. Isentropic and kinematic methods. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D19, p. 23927-23939, Oct. 1996.

Gregory, G. L.; Browell, E. V.; Gahan, L. S. Boundary layer ozone: An airborne survey above the Amazon basin,. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. D2, p. 1452-1468, Feb. 1988.

Harriss, R. C.; Wofsy, S. C.; Garstang M.; Browell, E. V.; Molion, L. C. B.; McNeal, R. J.; Hoell, J. M.; Bendura, R. J.; Beck, S. M.; Navarro, R. L.; Riley, J. T.; Snell, R. L. The Amazon boundary layer experiment (ABLE 2A): dry season 1985. **Journal of Geophysical Research**, v.93, n. D2, p. 1351 – 1360, Feb. 1988.

Harriss, R. C.; Garstang M.; Wofsy, S. C.; Beck, S. M.; Bendura, R. J.; Coelho, J. R. B.; Drewry, J. W.; Hoell, J. M.; Matson, P. A. Jr.; McNeal, R. J.; Molion, L. C. B.; Navarro, R. L.; Rabine, V.; Snell, R. L. The Amazon boundary layer experiment: wet season 1987. **Journal of Geophysical Research**, v.95, n. D10, p. 16721 – 16736, Sep. 1990.

Hoell, J.M.; Davis, D. D.; Gregory, G. L.; McNeal, R. J.; Bendura, R. J.; Drewry, J. W.; Barrick, J. D.; Kirchhoff, V. W. J. H.; Motta, A. G.; Navarro, R. L.; Dorko, W. D.; Owen, D. W. Operational overview of the NASA GTE/CITE 3 airborne instrument intercomparisons for sulfur dioxide, hydrogen sulfide, carbonyl sulfide, dimethyl sulfide and carbon disulfide. **Journal of Geophysical Research**, v.98, n. D12, p. 23291-23304, Dec.1993.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC). **Mapa de focos de queimada**. [online]. < www.cptec.inpe.br>. 1999.

Kahl, J. D.; Harris, J. M.; Hebert, G. A. Intercomparison of three long-range trajectory models applied to Arctic haze. **Tellus**, v. 41B, n. 5, p. 524-536, 1989.

- Kirchhoff, V. W. J. H. **Química da atmosfera**. São José dos Campos, nota: parte do curso “Geofísica da alta atmosfera”, da SBGF, apresentado na 36^o Reunião anual da SBPC, 04-11 de jul., São Paulo, 1984 INPE-3190-PRE/554.
- Kirchhoff, V. W. J. H. Geoquímica da média e baixa atmosfera: impactos ambientais por deterioração da camada de ozônio. **Geochimica Brasiliensis**, v. 2, n.1, p. 41-52, 1988 a.
- Kirchhoff, V. W. J. H. Surface ozone measurements in Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. D2, p.1469-1476, 1988 b.
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Browell, E.V. and Gregory, G.L. Ozone measurements in the troposphere of an Amazonian rain forest environment. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, D 12, p.15850-15860, Dec. 1988.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Marinho, E. V. A. A concentração de monóxido de carbono (CO) no ar como parâmetro de pureza. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 6, n. 1, p. 9-16, jun./dez. 1988.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Setzer, A. W. ; Pereira, M. C. Biomass burning in Amazonia. **Geophysical Research Letter**, v.16, n.5, p. 469-472, May 1989.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Marinho, E. V. A. A survey of continental concentrations of atmospheric CO in the southern hemisphere. **Atmospheric Environment**, v. 23, n. 2, p. 461-466, 1989.
- Kirchhoff, V. W. J. H. ; E. V. A. Marinho. Surface carbon monoxide measurements in Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, p. 16933-16943, Sep. 1990.

- Kirchhoff, V.W.J.H.; Rasmussen, R.A. Time variations of CO and O₃ concentrations in a region subject to biomass burning. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D 6, p. 7521-7532, May 1990.
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Silva, I.M.O. and Browell, E.V. Ozone measurements in Amazonia: dry season vs. wet season. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D 10, p. 16913-16926, Sep. 1990.
- Kirchhoff, V. W. J. H. **Queimadas na Amazônia e efeito estufa**. São Paulo: Contexto, 118 p., 1992.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Nobre, A. C.; Pereira, E. B.; Marinho, E. V. A.; Souza, A.; Pavão, H. G.; Freire, E. D.; Silva, V.; Silva, I. M. O.; Marques, J.; Cassetti, V.; Santos, M. H.; Guimarães, S.; Coutinho, L.M. TRACE A Brazil: Proceedings of the 2nd Workshop, **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 10, n. 1, p. 65-81, jul. 1992.
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Nakamura, Y.; Marinho, E.V.A. and Mariano, M.M. Excess ozone production in Amazonia from large scale burnings, **Journal Atmospheric Terrestrial Physics**, v. 54, n. 5, p. 583-588, May 1992.
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Marinho, E. V. A. Layer enhancements of tropospheric ozone in regions of biomass burning. **Atmospheric Environment**. v. 28, n. 1, p. 69-74, Jan. 1994.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Alvalá, P. C. Overview of an aircraft expedition into the Brazilian cerrado for the observation of atmospheric trace gases. **Journal of Atmospheric Research**, v. 101, n. D19, p. 23973-23982, Oct. 1996.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Alves, J. R.; da Silva, F. R.; Fishman J. Observations of ozone concentrations in the Brazilian cerrado during the TRACE A field expedition. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n.D19, p. 24029-24042, Oct. 1996.

The Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). O experimento de grande escala da biosfera-atmosfera na Amazônia (LBA). **Plano Experimental Conciso**, 48 p., 1996.

LI-COR. **CO₂ Analyser Instruction Manual**, Lincoln, USA ,1990.

Logan, J. A.; Prather, M. J.; Wofsy, S. C.; McElroy, M. B. Tropospheric chemistry: A global perspective. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n.C8, p. 7210-7254, Aug. 1981.

Longo, K. M.; Thompson, A. M.; Kirchhoff, W. J. H.; Remer, L. A.; Freitas, S. R. de; Dias, M. A. F. S.; Artaxo, P.; Hart, W. Spinhirne, J. D.; Yamasoe, M. A. Correlation between smoke and tropospheric ozone concentration in Cuiabá during Smoke, Clouds and Radiation-Brazil (SCAR-B). **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D10, p. 12113 – 12129, May 1999.

Mariano, M. M. **Estudo das concentrações de ozônio no cerrado brasileiro**. São José dos Campos. 149 p. (INPE-5447-TDI/493). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992.

Merril, J.T.; Black, R.; Boudra, D. Techniques of Lagrangian trajectory analysis in isentropic coordinates. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 3, p. 571-581, Mar. 1986.

National Center for Environment Prediction (NCEP). **Dados meteorológicos**. [online]. <http://wesley.wwb.noaa.gov/ncep_data/index.html>. 1998.

Neftel, A.; Oeschger, H.; Schwander, J.; Stauffer, B.; Zimbrunn, J. Ice core sample measurements give atmospheric CO₂ content during the past 40,000 yr. **Nature**, v. 295, n. 5846, p. 220 - 223, 1982.

- Neftel, A.; Morr, E.; Oescheger, H.; Staufer, B. Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. **Nature**, v.315, n. 6014, p. 45 - 47, 1985.
- Nobre, C. A.; Mattos, L. F.; Dereczynski, C. P.; Tarasova, T. A.; Trosnikov, I. Overview of atmospheric conditions during the Smoke, Clouds and Radiation-Brazil (SCAR-B) field experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 31809 - 31820, Dec. 1998.
- Novelli, P. C.; Masarie, K. A. and Lang P. M. Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D15, p. 19015 - 19033, Aug. 1998.
- Ogawa, T.; Komala, N. Diurnal and seasonal variations of tropospheric ozone in tropical Asia. In: Bojkov, R. D., Fabian, P. ed. **Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium 1988 and Tropospheric Ozone Workshop**. Gottingen, Germany, p. 437-440, 4-13 Aug. 1988.
- Pavão, H. G. **O gás carbônico atmosférico: variações e influência das queimadas em várias regiões do Brasil**. São José dos Campos, 99p. (INPE-5673-TDI/563). Tese (Doutorado em Ciência Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994.
- Pereira E. B.; Setzer, A. W.; Gerab, F.; Artaxo, P. E.; Pereira, M. C.; Monroe, G. Airborne measurements of aerosols from burning biomass in Brazil related to the TRACE A experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D19, p. 23983-23992, Oct. 1996.
- Pickering, K. E.; Thompson, A. M.; McNamara, D. P.; Schoeberl, M.R. An intercomparasion of isentropic trajectories over the South Atlantic. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 864-879, May 1994.

- Pickering , K. E.; Thompson, A. M.; McNamara, D. P.; Schoeberl, M.R;
Fuelberg, H. E.; Loring Jr. R. O.; Watson, M. V.; Fakhruzzaman, K.;
Bachmeier, A. S. TRACE A trajectory intercomparison, 1, Effects of different
input analyses. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n. D19, p.23909-
23926, Oct. 1996.
- Purnell, D. K. Solution of the advective equation by upstream interpolation with
a cubic spline. **Monthly Weather Review**, v. 104, n. 1, p. 42-48, Jan. 1976.
- Raynaud, D.; Barnola, J. M. An Antarctic ice core reveals atmospheric CO₂
variations over the past few centuries. **Nature**, n.315, n.6017, p. 309 – 311,
1985.
- Rezende, D. **Sequestro de carbono: uma experiência concreta**. Goiânia:
Editora Gráfica Terra, 2000, 105p.
- Roelofs, G.J.; Lelieveld, J. Smit, H. G. J.; Kley, D. Ozone production and
transports in the tropical Atlantic region during the biomass burning season.
Journal of Geophysical Research, v. 102, n.D9, p. 10637-10651, May
1997.
- Sachse, G. W.; Harriss, R.C.; Fishman, J.; Hill, G. F.; Cahoon D. R. Carbon
monoxide over the Amazon Basin during the 1985 dry season. **Journal of
Geophysical Research**, v. 93, n. D2, p. 1422-1430, Feb. 1988.
- Sanhueza, E.; Octavio, K. H.; Arrocha, A. Surface ozone measurements in the
Venezuelan tropical savannah. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 2, n.
4, pp. 377–385 Apr., 1985.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Dias, P. L. S. **Meteorology of the south
hemisphere**. Boston, Massachusetts: American Meteorology Society, Dec.
1998, v.27, n. 49, p. 119 – 139.

- Seiler, W.; Junge, C. Carbon monoxide in the atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 12. p. 2217-2226, Apr. 1970.
- Seiler, W. The cycle of atmospheric CO. **Tellus**, n.2, p. 116-135, 1974.
- Setzer, A. W.; Pereira, M. C.; Pereira A. C. O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil. **Climanálise**, v. 7, n. 8 p. 41-53, 1992.
- Steiguer, J. E. de, Pye, J. M.; Love, C.S. Air pollution damage to U.S. forests. **Journal of Forestry**, v.88, n.8, p. 17-22, Aug. 1990.
- The Grid Analysis and Display System (GRADS). **Manual**. Sep. 1995, 148 p.
- Tilton, B. E. Health effects of tropospheric ozone. **Environment Science Technology**, v. 23, n.3, p.257-263, 1989.
- Thompson, A. M.; Pickering, K. E.;McNamara, D.P.; Schoeberl, M. R.; Hudson, R. D.; Kim, J. H.; Browell, E. V.; Kirchhoff, V. W. J. H.; Nganga, D. Where did tropospheric ozone over south Africa and the tropical Atlantic come from in October 1992? Insights from TOMS, GTE, TRACE A, and SAFARI 1992. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D19, p.24251-24278, Oct. 1996.
- Troniskov, I.; Nobre, C. A. Estimation of aerosol transport from biomass burning areas during SCAR – B experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p.32129-32137, Dec.1998.
- Vianello, R. L.; Alves, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária (UFV), 1991. 449p.
- Watson, C. E.; Fishman, J.; Reichle Jr. H. G. The significance of biomass burning as a source of carbon monoxide and ozone in the south hemisphere tropics: A satellite analysis. **Journal of Geophysical Research**, v.95, n.10, p.16443-16450, Sep. 1990.

Williamson, D. L.; Rasch, P.L. Two-dimensional semi-Lagrangian transport with shape-preserving interpolation. **Monthly Weather Review**, v.117, n.1, p. 102-129, Jan. 1989.

Winkler, P. Surface ozone over the Atlantic Ocean. **Journal of Atmospheric Chemistry**, n.7, p.73-91,1988.

APÊNDICE A

Medidas Aéreas de O₃ e CO₂ ao Longo do
“Corredor de Circulação de Massas de Ar”

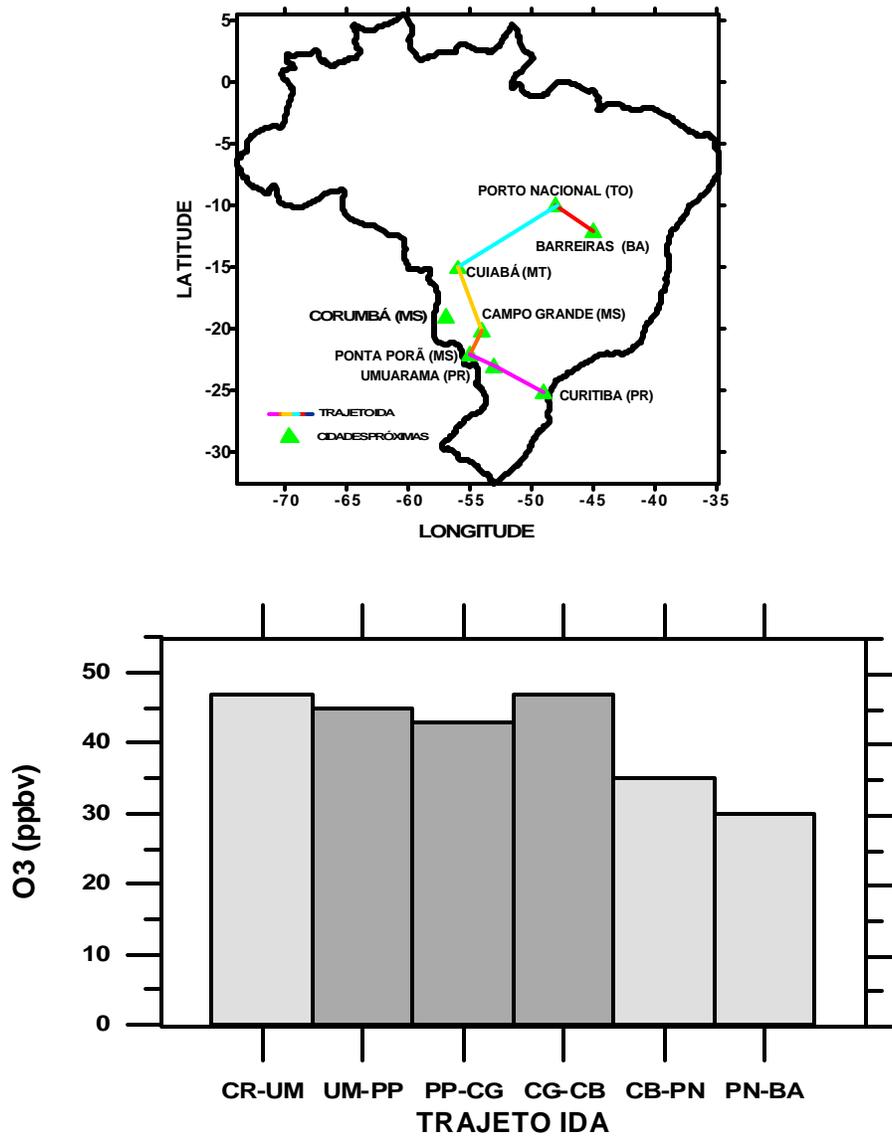


Fig. A1 – Trajeto de ida ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de O₃/trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999. As siglas correspondem às cidades de: CR = Curitiba (PR); UM = Umuarama (PR); PP = Ponta Porã ; CG = Campo Grande (MS); CB = Cuiabá (MT); PN = Porto Nacional (TO) e BA = Barreiras (BA).

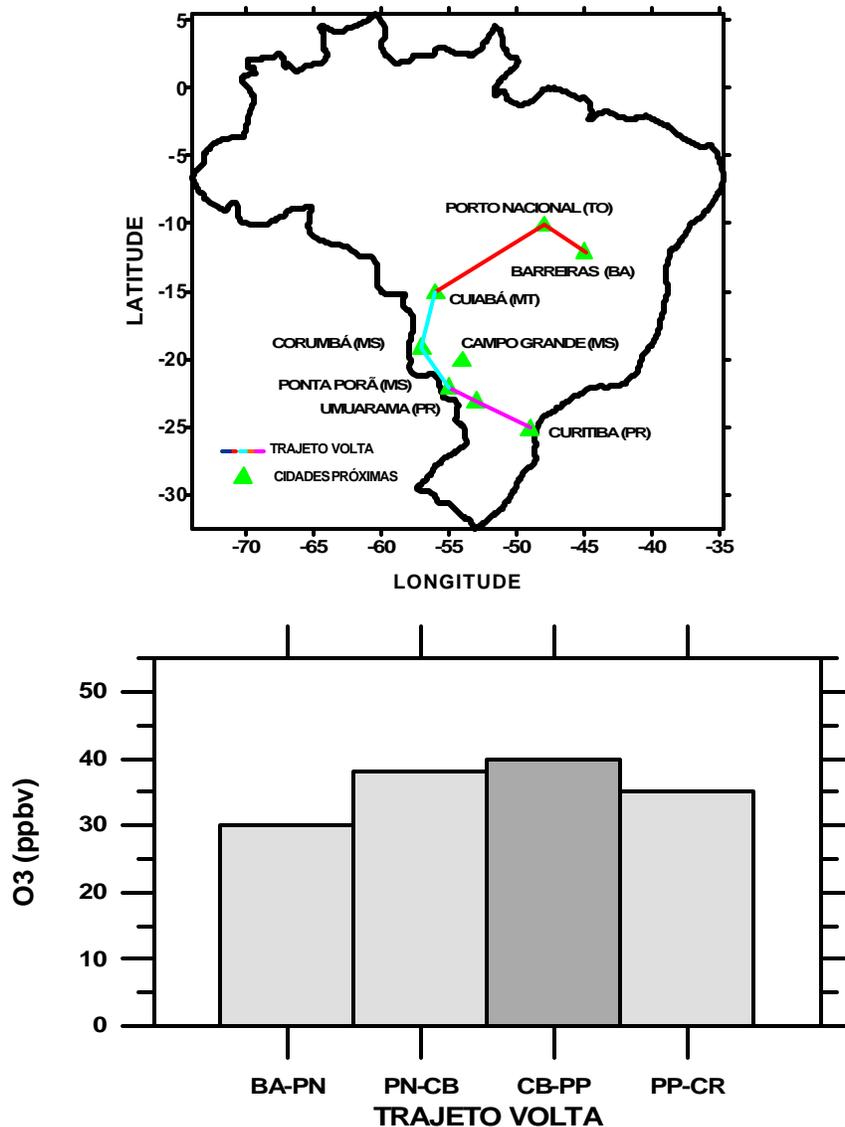


Fig. A2 – Trajeto de volta ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de O₃/trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 18 a 21/09/1999. As siglas correspondem às cidades de: BA = Barreiras (BA); PN = Porto Nacional (TO); CB = Cuiabá (MT); PP = Ponta Porã e CR = Curitiba (PR).

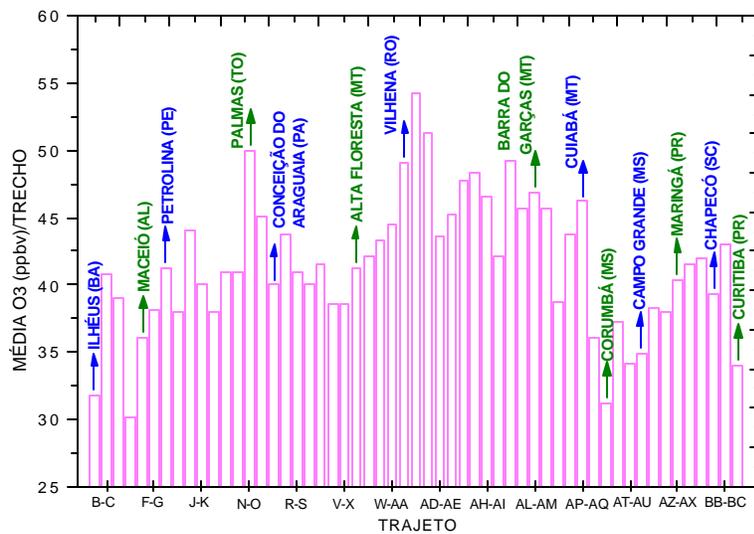
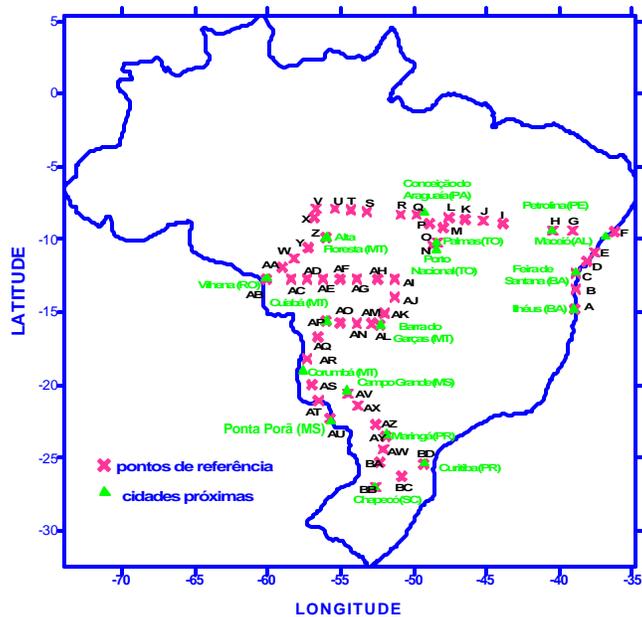


Fig. A3 – Trajeto ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de O₃/trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 01 a 07/09/2000.

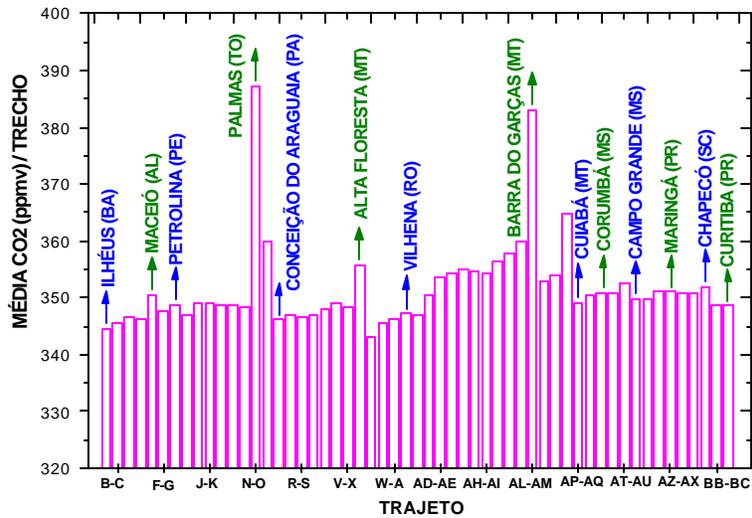
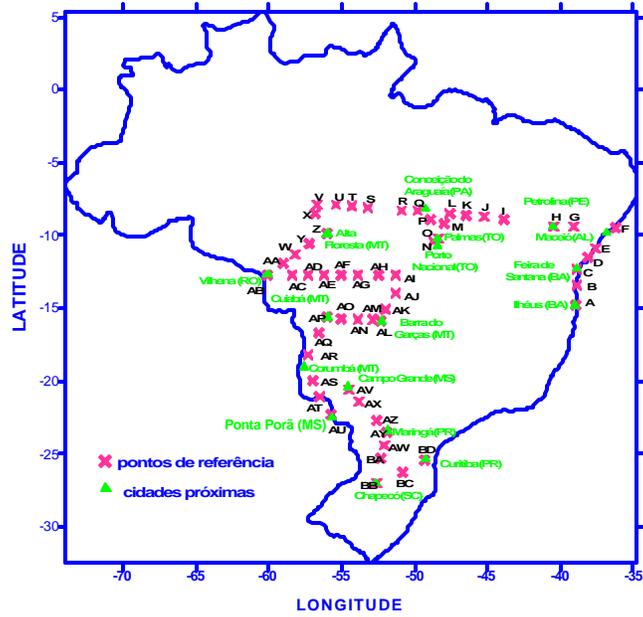


Fig. A4 – Trajeto ao longo do “corredor de circulação de massas de ar” e as concentrações médias de CO₂/trecho. Vôo com o avião Bandeirante do INPE período de 01 a 07/09/2000.

APÊNDICE B

Programa para o Cálculo do Termo de Transporte

```

CLS
PRINT "Programa para o cálculo da concentração de contaminantes
transportados"
PRINT
INPUT "que arquivo gostaria de abrir?", arquivo$
INPUT "Entre com o número de regiões", nr%
DIM r$(nr%)
DIM Cm!(nr%)
DIM Cb!(nr%)
DIM F!(nr%)
DIM N!(nr%)
FOR i% = 1 TO nr%
INPUT "Entre com a região a ser analisada"; r$(i%)
PRINT
INPUT "Entre com a concentração medida"; Cm!(i%)
PRINT
INPUT "Entre com a concentração de background"; Cb!(i%)
PRINT
INPUT "Entre com o fator de conversão F"; F!(i%)
PRINT
INPUT "Entre com o número de focos"; N!(i%)
PRINT
Ct!(i%) = Cm!(i%) - Cb!(i%) - (F!(i%) * 2 * N!(i%))
PRINT
PRINT "A concentração devido ao transporte para a região"; r$(i%);
PRINT "é igual a"; Ct!(i%); "ppbv."
PRINT
PRINT
NEXT i%
PRINT "O resultado é:"
PRINT
PRINT "Região      Cm (ppbv);      Cb(ppbv);      F(ppbv/foco);
N(focos);      Ct(ppbv); "
PRINT "- - - - -"
- - -"
FOR i% = 1 TO nr%
' inicializa gab$, um gabarito para PRINT USING
gab$ = "\ \      ###.###      ###.###      ###.###      ###.###
###.### "
PRINT USING gab$; r$(i%); Cm!(i%); Cb!(i%); F!(i%); N!(i%); Ct!(i%)
NEXT i%
OPEN arquivo$ FOR OUTPUT AS #1
FOR i% = 1 TO nr%
WRITE #1, r$(i%), Cm!(i%), Cb!(i%), F!(i%), N!(i%), Ct!(i%)
NEXT i%
CLOSE #1
PRINT
PRINT
PRINT
PRINT
PRINT "dados gravados com sucesso em arquivo$"

```