

PROJETO FOGO: UM EXPERIMENTO PARA AVALIAR EFEITOS DAS QUEIMADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA BAIXA ATMOSFERA

E.V.A. Marinho & V.W.J.H. Kirchhoff

O projeto fogo foi idealizado com o objetivo de estudar o efeito das queimadas da palha da cana-de-açúcar sobre os gases atmosféricos ozônio (O_3), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2). Foram realizadas várias campanhas de campo na superfície e no ar, a bordo de um avião Bandeirante instrumentado, na região canavieira do Estado de São Paulo. Efeitos muito expressivos foram observados nas concentrações de CO e O_3 . Na época chuvosa quando não há queimadas as concentrações até 6 km de altitude são menores que 30 ppbv (partes por bilhão por volume), para o O_3 e cerca de 100 ppbv para o CO. Na época de queimada de palha da cana (setembro) foram observadas concentrações de até 80 ppbv a cerca de 1,5 km de altitude para o O_3 , e 600 ppbv para o CO. Deve-se notar que estas medidas foram feitas a vários quilômetros de distância das fontes poluidoras, para caracterizar o estado médio da atmosfera inferior em equilíbrio. Estima-se que somente no Estado de São Paulo as queimadas da cana injetam na atmosfera cerca de 350.000 toneladas de carbono na forma de CO.

PROJECT FIRE: AN EXPERIMENT TO EVALUATE THE EFFECTS OF SUGAR CANE BURNINGS IN THE LOWER ATMOSPHERE – Project Fire was designed to study the effects that sugar cane burnings have on the atmospheric gases ozone (O_3), carbon monoxide (CO), and carbon dioxide (CO_2). Several field campaigns were conducted at the surface and on board of an aircraft, an instrumented Bandeirante, which flew over the sugar cane region of São Paulo. Strong enhancements were observed both in CO and O_3 concentrations. During the rainy season, when there are no burnings, the concentrations up to 6 km of altitude are less than 30 ppbv (parts per billion by volume), for O_3 and about 100 ppbv for CO. During the sugar cane burning period (September), we have observed concentrations up to 80 ppbv at about 1.5 km of altitude for O_3 and 600 ppbv for CO. It must be emphasized that such measurements were made several kilometers away from the pollution sources, characterizing in this way the mean state of the lower atmosphere in equilibrium. We estimate that only in the São Paulo region the sugar cane burnings inject into the atmosphere about 350,000 tons of carbon in the form of CO.

INTRODUÇÃO

A produção de açúcar foi por muito tempo uma atividade que preponderava no Nordeste. Recentemente houve o deslocamento paulatino da produção na direção Centro-Sul. Assim, tornou-se o Brasil talvez o único país grande produtor no mundo, que realiza duas colheitas por ano: uma no Norte-Nordeste, de dezembro a maio, e outra na região Centro-Sul de julho a dezembro. Devido a esta característica e visando criar a independência do mercado nacional no que concerne aos combustíveis de automóveis, foi criado o Proál-

cool, Programa Nacional de Álcool (Decreto 76593, de 14/11/1975).

O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e álcool. Até 1975 eram produzidos no país cerca de 500 milhões de litros por ano, utilizados na fabricação de bebidas e açúcar além da indústria farmacêutica. Com a instituição do Proálcool, o álcool começou a ser adicionado à gasolina dos automóveis a partir de 1976 e em 1979 foram fabricados os primeiros veículos movidos a álcool. Este fato elevou a produção deste combustível a 12 bilhões de litros anuais. A área de cana-de-açúcar colhida em todo o Brasil no

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/SCT, Caixa Postal 515, 12201 São José dos Campos, SP

ano de 1989 foi de 4,1 bilhões de hectares, sendo que o Estado de São Paulo sozinho contribuiu com mais de 50% da produção nacional. A milenar técnica da queimada usada pelos agricultores primitivos donos de pequenas culturas, é a mesma ainda empregada hoje em dia nos gigantescos canaviais, para agilizar e facilitar o trabalho de corte e desponte manual da cana na época da colheita. Além das partículas e aerossóis, as queimadas emitem para a atmosfera uma grande quantidade de gases dentre eles o dióxido de carbono, CO₂, principal gás do efeito estufa, e o monóxido de carbono, CO, gás reativo e tóxico quando em concentrações elevadas. A emissão destes e outros gases, sob a ação ultravioleta solar, pode produzir grandes quantidades de ozônio, O₃, o qual, além de tóxico, contribui também ao efeito estufa. Sob a influência do deslocamento das massas de ar, estes poluentes podem ser transportados para longe dos locais de produção, influenciando desta maneira regiões remotas.

Para acompanhar o "boom" no mercado do álcool combustível foram necessárias várias modificações no sistema de colheita e produção, dentre elas a melhoria, modernização e expansão das usinas, aumento significativo das áreas plantadas e agilização dos processos de corte e transporte de cana.

Na Tab. 1 tem-se a evolução anual da área colhi-

da (milhões de hectares, Mha), e correspondente produção (milhões de toneladas, Mt) de cana-de-açúcar para o Brasil e o Estado de São Paulo, de 1975 a 1989. Estes dados estão contidos em publicações mensais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1975 a 1989). Paralelamente, a partir de 1983 o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) em convênio com a SERPRO e a FUNCATE, lançaram o projeto CANASATE (Mendonça et al., 1989), cujo objetivo era a obtenção, através de interpretação de imagens de satélite, da distribuição espacial e da estimativa de área da cultura da cana-de-açúcar, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Verifica-se que a produção nacional de cana-de-açúcar cresceu 2,8 vezes em 15 anos enquanto que no Estado de São Paulo, no mesmo intervalo de tempo, o aumento foi de 3,7 vezes, o que corresponde, desde 1984, a cerca de 50% da produção brasileira. Notar, no entanto, que o fator de aumento na produção de álcool foi bem maior (de 500 milhões de litros até 1975 a 12 bilhões de litros em 1988) devido a vários melhoramentos introduzidos no cultivo da cana e nos métodos de produção. São cerca de 270 usinas em todo o país sendo que 101 estão localizadas na região Norte-Nordeste e 169 na região Centro-Sul. No Estado de São Paulo existem 93 usinas em funcionamento. A importância de São Paulo, no que concer-

Tabela 1. Cana-de-açúcar no Brasil e no Estado de São Paulo.

Table 1. Production of sugar cane in Brazil and in the State of São Paulo.

Ano	Brasil		São Paulo		% de São Paulo	
	Área colhida milhões de HA (Mha)	Quantidade produzida (Mt)	Área colhida milhões de HA (Mha)	Quantidade produzida (Mt)	Área colhida	Quantidade produzida
1975	2,0	92	0,6	36	30%	39%
1976	2,1	103	0,7	46	33%	45%
1977	2,3	120	0,8	52	35%	43%
1978	2,4	129	-	-	-	-
1979	2,5	139	0,9	64	36%	46%
1980	2,6	149	1,0	73	38%	49%
1981	2,8	156	1,1	74	39%	47%
1982	3,1	187	1,3	92	42%	40%
1983	3,5	216	1,5	115	43%	53%
1984	3,7	222	1,6	117	43%	53%
1985	3,9	247	1,7	128	44%	52%
1986	4,0	239	1,7	116	43%	49%
1987	4,3	269	1,7	130	40%	48%
1988	4,1	258	1,9	135	46%	52%
1989	4,1	261	1,7	132	41%	51%

ne à cana-de-açúcar, foi um dos principais motivos pelo qual esta região foi escolhida para realização do Projeto Fogo, sendo que os mapas do Projeto CANASATE auxiliaram na escolha da região do experimento.

Existem diversas espécies de cana-de-açúcar com características distintas. Em geral, porém, e se bem tratadas, elas podem chegar a quase quatro metros de altura e ter um grande volume de folhas, de 40 a 150 toneladas/hectare (t/ha), enquanto que a maioria das outras culturas produz de 1 a 4 t/ha (Fernandes, 1988), isto é, a cana produz cerca de 100 vezes mais matéria orgânica fibrosa do que as outras culturas. As canas são plantadas com 1,5 m de espaçamento, e é realmente incrível constatar que o canavial torna-se totalmente impenetrável à medida que a cana cresce, tal o volume de folhas.

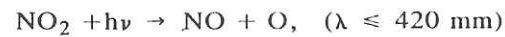
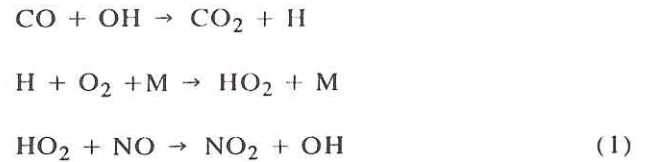
Quando a cana amadurece sua folhagem seca, possibilita o risco de incêndios acidentais com os trabalhadores no interior do canavial, sendo este, além disso, habitat de animais peçonhentos como cobras, aranhas, etc. As probabilidades de ferimento com o facão no corte de cana não queimada são maiores, devido à dificuldade de se trabalhar com palha atrapalhando a visão. O desgaste físico do operador torna-se maior, por necessitar maior quantidade de movimentos para corte, desponte e limpeza da cana. Em 10 (dez) minutos queima-se um talhão (5 hectares) de cana. A cana é cortada imediatamente após a queima, sem palha, bichos, perigo. Calcula-se que um homem pode cortar cerca de 0,5 tonelada de cana sem queimar por dia. Quando a cana é queimada antes do corte, este valor aumenta para 5 toneladas (Fernandes, 1988), isto é, dez vezes mais. Todos estes fatores são lembrados para justificar a prática da queimada.

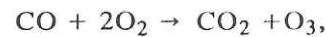
Por outro lado, a colheita da cana pode ser totalmente mecanizada. Existem hoje máquinas extremamente eficientes que colhem a cana, separam-na da folhagem e cortam-na em pedaços de tamanho adequado, facilitando o transporte. Entretanto, por problemas sociais, técnicos, culturais, e principalmente econômicos as colhedoras ainda não foram introduzidas em larga escala. A colheita mecanizada é realizada principalmente pela Austrália e EUA, enquanto que os demais grandes produtores, Cuba, Índia e Brasil, realizam a colheita manual.

A FOTOQUÍMICA DO O₃ e CO

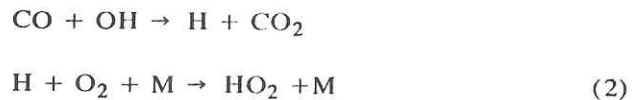
A principal fonte de ozônio na troposfera é a produção fotoquímica que responde por 85% do ozônio local, enquanto que os 15% restantes são provenientes da estratosfera (Fishman, 1985). Os principais gases que geram o ozônio, através da oxidação fotoquímica, são o CO, CH₄ e hidrocarbonetos não metâ-

nicos (HCNM) na presença dos óxidos de nitrogênio, NO e NO₂. O mecanismo de oxidação para o CO pode ser descrito por uma das duas seqüências de reações abaixo (Crutzen, 1983),





onde se tem como resultado final a produção de ozônio e dióxido de carbono, ou:





onde se tem a destruição de ozônio.

A primeira série de reações tem maior probabilidade de ocorrer em regiões onde a concentração de NO for maior que 5 a 10 ppbv (Crutzen, 1983), ou seja em regiões continentais e principalmente próximo a centros poluidores, como no presente caso em áreas de queimadas. Segundo Logan (1985) e Sillman et al. (1989), cada molécula de CO pode gerar uma molécula de ozônio segundo a série de reações (1), enquanto que a produção de O₃ pela oxidação do CH₄ pode ser tão grande quanto 3,5 e a produção final de ozônio pelos HCNM maior ainda, podendo ir de 10 a 14 moléculas de ozônio para o butano e o pentano.

MOTIVAÇÃO DO EXPERIMENTO

Nosso maior interesse e preocupação são as queimadas que ocorrem nas regiões da floresta Amazônica e do Cerrado (Kirchhoff, 1988a; Kirchhoff & Marinho, 1989), pela importância global que podem ter em relação ao efeito estufa e química da atmosfera. No entanto, em Kirchhoff et al. (1991), chamamos a

atenção para o fato de que a quantidade de matéria seca queimada nos canaviais por ano por unidade de área é cerca de 15 vezes maior que na Amazônia, isto é, 0,5 kg/m² enquanto que na Floresta Amazônica tem-se 0,03 kg/m². Quando a cana é queimada antes da colheita, ocorre a produção de grande quantidade de fumaça, dependendo das condições atmosféricas e estado vegetativo das plantas. Sob clima quente e seco, no canavial com grande volume de folhas secas, o fogo é intenso e extremamente rápido. Deste fato nasceu também nosso interesse pelo estudo das queimadas de cana, e a constatação de que o interior do Estado de São Paulo é no momento um laboratório natural único no mundo para estes estudos. Em trabalhos anteriores Crutzen et al. (1985), Delany et al. (1985), e Greenberg et al. (1984) estudaram os efeitos das queimadas nas regiões do Cerrado e da floresta equatorial brasileiras. Em Kirchhoff et al. (1989a), mostrou-se os perfis de CO e O₃ obtidos durante o experimento Fogo sobre canaviais, em comparação com os obtidos por Crutzen et al. (1985) sobre o Cerrado e a Selva.

Durante as queimadas ocorre a liberação de gases precursores do ozônio dentre eles o monóxido de carbono, o metano e hidrocarbonetos não metânicos os quais sob a ação dos raios solares produzem o ozônio em grandes quantidades (Crutzen, 1983). Este fenômeno, o processo de formação de espécies gasosas, durante episódios de poluição, é conhecido como "smog fotoquímico", que vem sendo muito estudado nas regiões urbanas, onde se pode identificar mais pre-

cisamente as diversas fontes poluidoras. Em Kirchhoff & Marinho (1989) e Kirchhoff et al. (1989b) mostrou-se que a concentração de CO e C₃ chega a triplicar durante a estação seca na estação de Cuiabá, comparada à época das chuvas, e que este fato se deve às queimadas na região do Cerrado e Amazônia.

O objetivo do Projeto Fogo é de medir as quantidades de gases lançados na atmosfera quando das queimadas, e quais as conseqüências que estes gases trarão para a atmosfera. As datas e os locais dos vôos que fazem parte deste experimento estão relacionados na Tab. 2. Como se sabe, o ozônio é um dos mais importantes componentes gasosos da nossa atmosfera. A camada de ozônio situada a cerca de 30 km de altitude, onde a concentração deste gás chega a 7 ppmv (partes por milhão por volume), blindada a Terra contra a radiação ultra-violeta (280-320 nm), letal para a vida terrestre. Este mesmo ozônio que por um lado nos protege, por outro pode ser nocivo à saúde de animais e plantas quando presente em altas concentrações nas camadas mais baixas da atmosfera, onde vivemos e respiramos. A motivação do Projeto Fogo é portanto muito clara. Com a existência de um fato novo (o Proálcool tem apenas 10 anos) surgiu no interior de São Paulo uma fonte nova, intensa, e periódica de produção de fumaça, gases primários (CO₂, CO, etc.) e gases secundários (O₃). O Projeto Fogo concentrou-se em medir esta produção de gases na região afetada. O valor normal típico das concentrações do CO e do O₃, sem influência antropogênica (o chamado "back-

Tabela 2. Datas e locais dos experimentos: Projeto FOGO I, II e III.

Table 2. Dates and sites of the field campaigns: Project Fire I, II and III.

Vôo	Data	Local	Horário	Altura (pés)	
1	31/08/88	7.6.5.4.5	09:00 - 11:35	1350/1050	FOGO I
2	01/09/88	5.3.1.8.7	09:30 - 12:10	1350/1050	FOGO I
3	01/09/88	7.6.5.4.5	16:17 - 17:57	2550/1350	FOGO I
4	02/09/88	5.4.3.1.9	09:10 - 12:30	Perfil	FOGO I
5	06/06/89	7.6.5.4.3	15:35 - 17:25	1350	FOGO II
6	07/06/89	3	12:30 - 16:40	Perfil	FOGO II
7	08/06/89	4	11:30 - 15:40	Perfil	FOGO II
8	19/09/89	7.8	09:20 - 12:58	6500, Perfil	FOGO III
9	19/09/89	8 - Cuiabá	13:45 - 16:35	Patamares	FOGO III
10	20/09/89	Chapada do Guimarães	10:10 - 13:03	Perfil	FOGO III
11	20/09/89	Cuiabá - 5	14:20 - 17:20	9000	FOGO III
12	21/09/89	4	09:25 - 12:45	Perfil	FOGO III
13	21/09/89	4	14:02 - 16:40	Perfil	FOGO III

ground'') é de 100 ppbv para o CO e 20 ppbv para o O₃, mas o valor exato depende do ambiente. Deve-se notar que a legislação brasileira prevê concentrações máximas para os acima citados: 35 e 9 ppmv de CO, respectivamente, durante uma e oito horas, e 80 ppbv de O₃ durante uma hora, sendo que estes valores não devem ser excedidos mais de uma vez por ano (Portaria Normativa nº 348 de 14/03/90).

MÉTODOS DE MEDIDAS

Neste projeto foram medidos os gases ozônio (O₃), monóxido de carbono (CO), e dióxido de carbono (CO₂), além do radônio-222. Foram também feitas medidas complementares de meteorologia de superfície e através de radiossondagens.

Como plataforma móvel de aquisição de dados foi usada a aeronave EMB-110-B1, o avião Bandeirante do INPE, de prefixo PP-FFV, que apresenta a vantagem de oferecer uma grande cobertura espacial. No avião foi montado um sensor de ozônio, fazendo medidas contínuas, e um sistema de coleta de amostras de ar, esporádico, para posterior análise em laboratório de gases de longa vida.

A determinação do ozônio foi feita de forma contínua com analisadores que operam segundo o princípio da absorção de radiação ultra-violeta pela molécula de ozônio cuja descrição está detalhada em Kirchoff (1988b). O fotômetro é muito estável e sua calibração é feita três vezes ao dia (8 h, 12 h, e 16 h). A precisão do aparelho é da ordem de 1% e o erro na exatidão das medidas, utilizando-se para aferição um fotômetro padrão, é menor que 3%. O limite de detecção é 1 ppbv.

Para as análises de CO e CO₂ coleta-se ar sob pressão através de bombas de diafragma, no interior de cilindros de aço inoxidável previamente evacuados. Estes cilindros tem o seu interior polido eletronicamente o que impossibilita a aderência de partículas sobre suas paredes. Os cilindros são então, enviados ao Laboratório de Ozônio do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos. As análises de CO são feitas através de cromatografia gasosa, descritas em Kirchoff & Marinho (1988, 1989). A calibração absoluta do instrumento é obtida, como de praxe em métodos de cromatografia, através de comparação com gases de concentração padrão. As operações são simples e rápidas e tem excelente resolução, e a precisão em torno de 100 ppbv é 0,2%.

Para as análises de CO₂ os cilindros amostrados são conectados a um outro cromatógrafo equipado com um conversor catalítico em linha com um detetor de ionização de chama (FID). O sistema catalítico (metanizador) converte o CO₂ e CO em CH₄, e este último é medido pelo detetor de ionização de chama. O

CH₄, CO e CO₂ que saem das colunas de separação, passam através do conversor por meio de válvulas, isto é, automaticamente. A Fig. 1 mostra a seqüência cromatográfica.

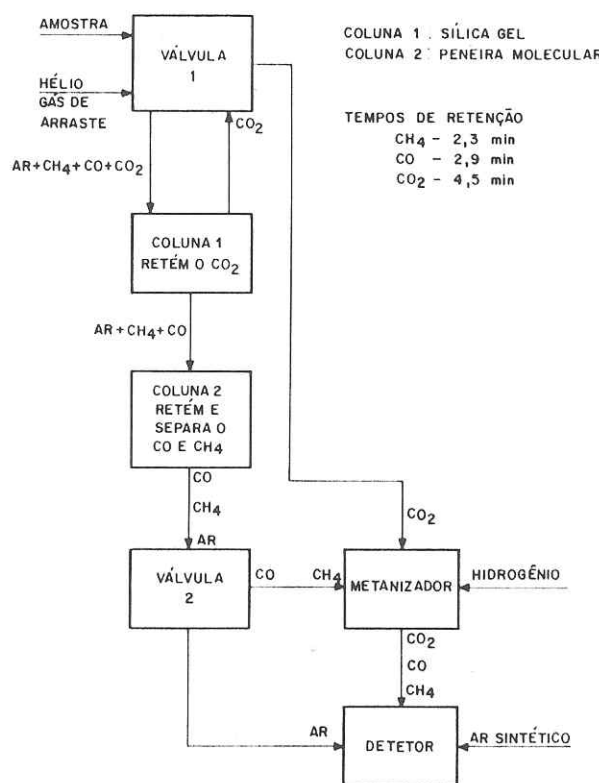


Figura 1. Esquema de válvulas e colunas do cromatógrafo a gás usado para análises de CO, CO₂ e CH₄.

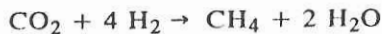
Figure 1. Valves and columns sequence of the gas chromatograph used for CO, CO₂ and CH₄ analysis.

Introduzida a amostra no sistema, o CO₂ fica retido na coluna 1 de sílica gel. O CO e CH₄ passando direto pela coluna 1, são retidos e separados na coluna 2 sendo que o ar vai direto para o detetor de ionização de chama. Por meio da válvula 2 o CO e CH₄ são desviados para o metanizador onde o CO sofre a seguinte reação:



O metano é o primeiro gás detetado (tempo de retenção ~ 2,3 minutos), logo em seguida vem o monóxido de carbono (tempo de retenção ~ 2,9 minutos). O tempo para o CO₂ escapar da sílica gel é suficientemente longo para permitir a detecção do CO e CH₄. Após a passagem do CO e CH₄, a seqüência de válvulas é mudada automaticamente deixando o gás CO₂ ir diretamente para o metanizador onde ocorre a

reação:



e finalmente para o FID (tempo de retenção do $\text{CO}_2 \sim 4,5$ minutos).

As concentrações de CO_2 em torno de aproximadamente 330 ppmv estão dentro da faixa dos limites ótimos de sensibilidade do detector de ionização de chama. Para calibração do CO e CO_2 utilizou-se o padrão de R. Rasmussen da Universidade de Oregon, EUA.

Os dados meteorológicos de superfície foram fornecidos pela UNESP - Campus de Jaboticabal, pelo Instituto Meteorológico de Bauru e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Radiossondagens feitas duas vezes ao dia durante os dias de voo em Bauru foram usadas para o cálculo de trajetórias de massas de ar.

ESTAÇÕES DE SUPERFÍCIE

As regiões do Estado de São Paulo onde a cana-de-açúcar é cultivada são mostradas na Fig. 2. Os locais escolhidos para instalação das bases de apoio de solo foram Jaboticabal (ponto 4, Fig. 2), que está situada em uma região de grande concentração canavieira, e onde contou-se com o apoio de pesquisadores da

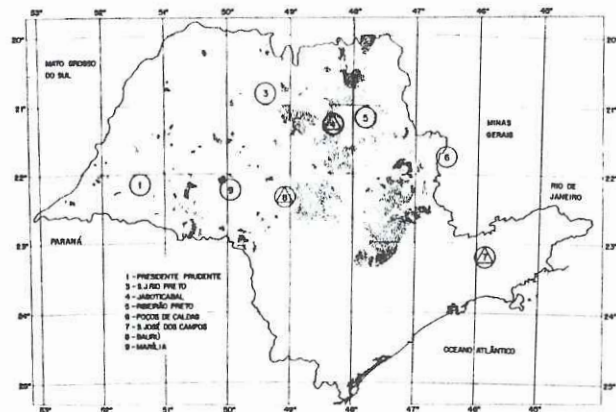


Figura 2. Mapa do Estado de São Paulo com a grade de latitude-longitude, onde as áreas sombreadas representam regiões canavieiras. Os triângulos circunscritos mostram a localização das estações de superfície e os círculos alguns pontos de referência.

Figure 2. Map of the state of São Paulo with latitude-longitude grid, where the dashed areas represent the sugar cane region. The triangles show the location of surface stations and some reference points are shown by the circles.

UNESP - Campus de Jaboticabal. A outra base foi Bauru onde contou-se com o apoio logístico do Instituto Meteorológico de Bauru. Bauru, ponto 8 da Fig. 2, encontra-se fora das regiões canavieiras, mas normalmente recebe massas de ar que vem das regiões queimadas. Nos dois institutos foram instalados sensores de ozônio de superfície que permaneceram em operação durante o Projeto Fogo I de 28 de agosto a 07 de setembro de 1988, Fogo II de 29 de maio a 09 de junho 1989, e Fogo III de 04 a 22 de setembro de 1989. Em Bauru foram realizadas radiossondagens, duas vezes ao dia, uma pela manhã e outra à tarde, durante a semana de vãos dos Projetos Fogo I e II.

O Laboratório de Ozônio do INPE é o centro de atividades onde estão alocados os pesquisadores e pessoal técnico do Projeto e os demais equipamentos de medida utilizados. Neste laboratório são feitas medidas rotineiras de ozônio de superfície, sendo analisadas amostras de ar coletados em diversas estações de superfície do país, inclusive Cuiabá, que foi uma estação base no Projeto Fogo III. Nas dependências do INPE-Cuiabá são também realizadas medidas rotineiras de ozônio de superfície e amostragens de ar em cilindros que são posteriormente remetidos ao laboratório de São José dos Campos.

ESTRATÉGIA DE TRABALHO

Os experimentos Fogo I e III foram realizados durante a estação seca quando os índices pluviométricos são muito baixos permitindo a ocorrência de quei-

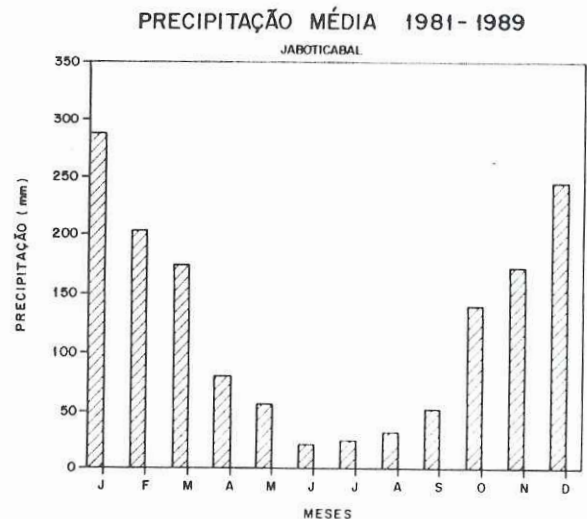


Figura 3. Precipitação média mensal no período de 1981 a 1989, sobre a cidade de Jaboticabal.

Figure 3. Mean monthly precipitation for the 1981 to 1989 period, for Jaboticabal.

madas. A Fig. 3 mostra a média de precipitação na região de Jaboticabal, para o período de 1981 a 1989, onde se observa nitidamente que os meses mais secos são junho, julho, agosto e setembro. Embora estes experimentos, Fogo I e III, tenham ocorrido na mesma época do ano, as condições meteorológicas foram distintas: durante agosto e setembro de 1988 a precipitação foi zero em várias regiões do país em particular nas regiões de Jaboticabal e Bauru. Nesta época foi decretado estado de alerta em todo o Estado de São Paulo, com a proibição expressa das queimadas. No ano seguinte, pelo contrário, o experimento teve que ser adiado tal a quantidade de chuva. Na Fig. 4 tem-se a precipitação diária no mês de setembro de 1989 para Jaboticabal e Bauru, onde se verifica a ocorrência de fortes precipitações em Bauru até meados de setembro.

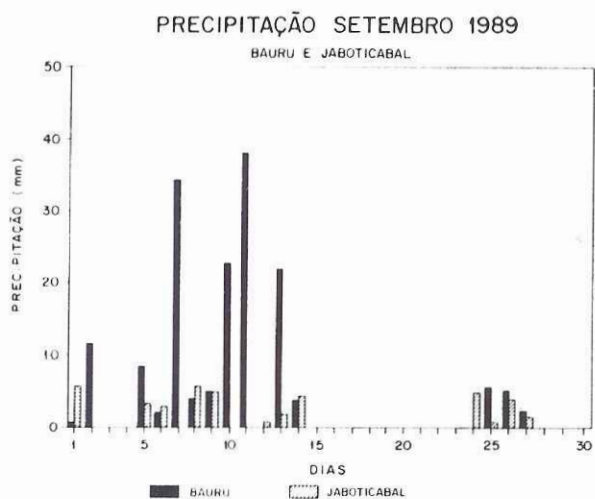


Figura 4. Precipitações diárias ocorridas em Jaboticabal e Bauru durante o mês de setembro de 1989.

Figure 4. Daily precipitation in Jaboticabal and Bauru during September 1989.

O experimento Fogo II teve lugar no final da estação chuvosa de 1989, quando as queimadas em grande escala ainda não haviam começado. O objetivo deste experimento foi o de observar a concentração de gases durante este período, para efeito de comparação com os resultados da época de queimadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estação chuvosa

A Fig. 5 mostra os perfis verticais do CO, CO₂ e O₃, obtidos nos dias 07 e 08 de junho de 1989, no fi-

nal da estação chuvosa, respectivamente em São José do Rio Preto (ponto 3, Fig. 2), e em Jaboticabal (ponto 4, Fig. 2), este último sobre região canavieira. Uma das características mais marcantes destes perfis é a praticamente constância em toda troposfera das concentrações dos gases CO (75 ± 21 ppbv), CO₂ (349 ± 3 ppmv) e O₃ (26 ± 5 ppbv) que é o resultado esperado de uma atmosfera bem misturada, em regime de chuvas. Estas concentrações obtidas para o Fogo II correspondem às concentrações de uma atmosfera limpa, isto é, podem ser consideradas o "background".

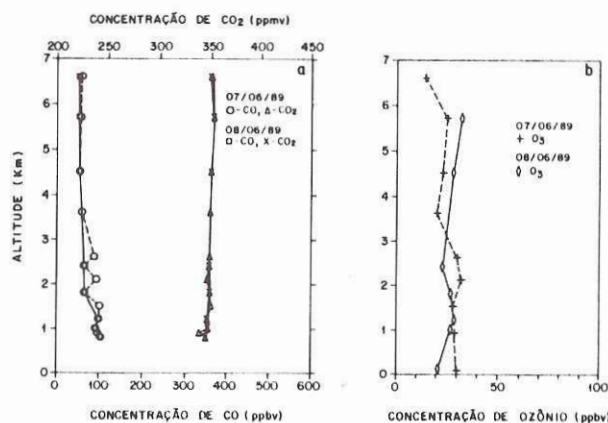


Figura 5. Perfis verticais do: a) monóxido e dióxido de carbono e b) ozônio, obtidos durante o experimento Fogo II.

Figure 5. Vertical profiles of: a) carbon monoxide and carbon dioxide and b) ozone during the field campaign Fire II.

Estação seca

Na Fig. 6 estão plotados os perfis de CO, obtidos durante os Projetos Fogo I e III, estação seca, conforme mostra a Tab. 2. Verifica-se uma grande diferença nas concentrações de CO obtidas nestes experimentos, sendo que, abaixo de 3,5 km de altitude, no Fogo I (curva 1) as concentrações chegam a ser três vezes maiores que as curvas 3 e 4. Isto se deve a dois fatores principais. O primeiro foi que nos dois meses que precederam o Fogo I, não ocorreram precipitações no Brasil Central (Boletim Agroclimatológico, 1988) incluindo São Paulo, o que fez com que a atmosfera ficasse saturada de poluentes, enquanto que no Fogo III (Boletim Agroclimatológico, 1989), conforme mostrou-se na Fig. 3, o total de chuva no mês de agosto e nos dias de setembro que precederam o experimento, foi de 50,1 mm em Jaboticabal, 179,7 mm em Bauru e 129,5 mm (total de agosto e setembro) em Cuiabá.

Estas chuvas além de "limpar" a atmosfera dificultaram as queimadas.

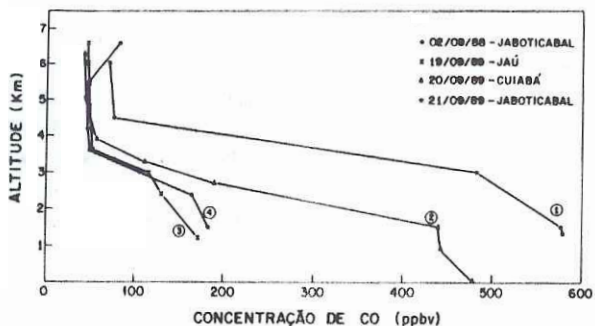


Figura 6. Perfis verticais do monóxido de carbono obtidos durante a estação seca, experimentos Fogo I e III.

Figure 6. Vertical profiles of carbon monoxide obtained during the dry season of the field campaigns Fire I and III.

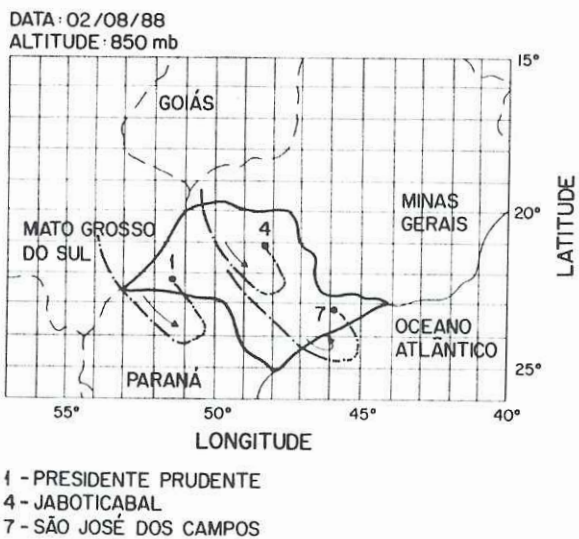
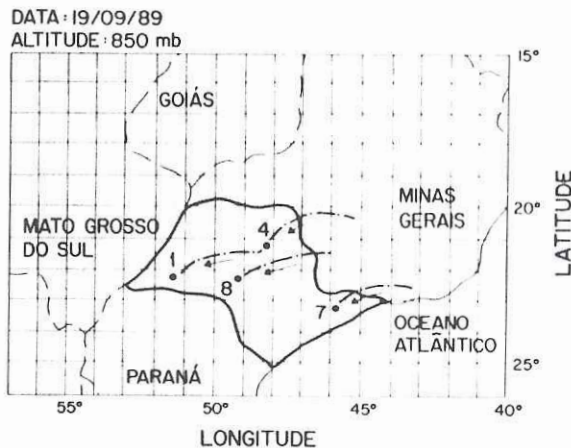


Figura 7. Trajetórias das massas de ar com pontos finais em Presidente Prudente (ponto 1), São José dos Campos (ponto 7) e Jaboticabal (ponto 4), para o dia 2 de setembro de 1988. Os símbolos foram plotados com intervalos de 5 horas.

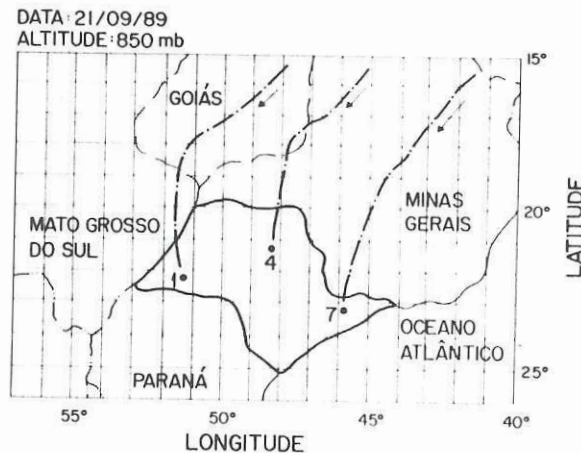
Figure 7. Air mass trajectories, with end points at Presidente Prudente (point 1), São José dos Campos (point 7) and Jaboticabal (point 4), for September 2nd 1988. The symbols were plotted with 5 hours interval.

As Figs. 7 e 8 mostram que o segundo, e mais importante fator para a diferença de concentrações obtidas no Fogo I e III, foi que as massas de ar para estes experimentos tiveram origens diferentes. A Fig. 7

mostra as trajetórias das massas de ar com pontos finais em Presidente Prudente, Jaboticabal, e São José dos Campos (pontos 1, 4 e 7 respectivamente da Fig. 2), obtidas no dia 02 de setembro de 1988, Fogo I, ao nível de 850 milibares (mb), aproximadamente a 1500 m acima do nível do mar. Nesta figura verifica-se que estas massas de ar originam-se sobre a região do Cer-



1 - PRESIDENTE PRUDENTE
4 - JABOTICABAL
7 - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
8 - BAURU



1 - PRESIDENTE PRUDENTE
4 - JABOTICABAL
7 - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Figura 8. Trajetórias das massas de ar com pontos finais em Presidente Prudente (ponto 1), São José dos Campos (ponto 7) e Jaboticabal (ponto 4). Os símbolos foram plotados com intervalos de 5 horas: a) dia 19 de setembro de 1989; b) dia 21 de setembro de 1989.

Figure 8. Air mass trajectories with end points at Presidente Prudente (point 1), São José dos Campos (point 7) and Jaboticabal (point 4). The symbols were plotted with 5 hours interval: a) September 19, 1989; b) September 21, 1989.

rado (ver Fig. 10) onde também ocorrem grandes queimadas nesta estação do ano. Na Fig. 8 tem-se as trajetórias para os dias 19 e 21 de setembro de 1989 (Figs. 8a, 8b), com pontos finais em Presidente Prudente, Jaboticabal e São José dos Campos, a 850 mb. Estas massas de ar fazem parte de um sistema proveniente do oceano trazendo portanto ar limpo (Abreu, 1985). Tem-se, portanto, que a curva 1 da Fig. 6 (Fogo I) representa o monóxido de carbono produzido pelas queimadas locais somado à contribuição devida às queimadas no Cerrado. As curvas 3 e 4 representam melhor a produção de CO pelas queimadas locais apenas, e a curva 2, cujo perfil foi realizado na região do Cerrado próximo a Cuiabá, representa a produção deste gás pelas queimadas que lá ocorrem. Ou em resumo, pelo deslocamento das massas de ar, distinguem-se três situações:

1. Fogo II: final da estação chuvosa, atmosfera limpa, "background";
2. Fogo III: estação seca, contribuição de queimadas locais;
3. Fogo I: estação seca, com contribuição de queimadas locais, além de uma contribuição diluída proveniente do Cerrado.

Apesar das diferenças de vegetação, os canaviais e Cerrados tem características em comum. A Tab. 3 mostra alguns parâmetros relacionados à queima para efeito de comparação. Verifica-se que a massa média e as temperaturas durante as queimadas, para Cerrado e canavial são semelhantes. O fogo se propaga com grande velocidade entre a palha dos canaviais e do Cerrado e a rápida queda da temperatura após o fogo permite o corte da cana imediatamente após as quei-

madas. Segundo Foster et al. (1980), a temperatura dentro do colmo da cana a 1,5 mm da superfície externa chega a quase 100°C, e a 2,5 mm a pouco mais de 50°C.

Levando-se em conta que a cana se assemelha aos arbustos queimados no cerrado, é interessante comparar a quantidade de massa seca queimada, M , nos canaviais e na região do Cerrado. A área total do Cerrado é de 2×10^6 km² dos quais são queimados anualmente de 10 a 20% (Delany et al., 1985) usando-se para o cálculo abaixo, o valor médio de 15%. A densidade de biomassa na região do Cerrado é de 2 kg/m² dos quais 63% ficam acima da superfície, e a eficiência efetiva de queima é de 66% (dados de Seiler & Crutzen, 1980, Tabs. I e VI). A biomassa queimada no Cerrado é, portanto:

$$M = A_d \times P_q \times D_m \times P_s \times E,$$

onde A_d é a área disponível, P_q a porcentagem queimada, D_m a densidade de biomassa, P_s a porcentagem acima da superfície, e E a eficiência de queima. O resultado é

$$M = 249,5 \text{ Mt de massa seca queimada,}$$

onde Mt designa milhões de toneladas.

Fazendo-se cálculo semelhante para os canaviais, com $A_d \times P_q = 4,1 \times 10^{10}$ m², $D_m \times P_s = 0,5$ kgm⁻², e $E = 0,9$

$$M = 18,4 \text{ Mt de massa seca queimada.}$$

Vê-se, portanto, que a massa seca queimada nos

Tabela 3. Biomassa acima da superfície, massa média e temperaturas durante o fogo para diferentes ecossistemas.

Table 3. Above surface biomass, mean mass and temperatures during the fire for different ecosystems.

	Área no Brasil (km ²)	Biomassa acima do solo (%) ^(a)	Densidade superficial kg/m ² ^(a)	Temperatura durante queimadas (°C)		
				Topo das chamas	Centro das chamas	Superfície do solo
Canaviais	$4,1 \times 10^4$	73	$0,5(e) - 1$	400(c)	400(c)	
Cerrado	2×10^6	63	2	600 - 800 ^(b)	300 - 400 ^(b)	70 - 90 ^(b)
Floresta	5×10^6	81	39		600 ^(d)	450 ^(d)

a) Seiler & Crutzen (1980); b) Coutinho (1980); c) Foster et al. (1980); d) Raison et al. (1986); e) Kirchhoff et al. (1989a)

canaviais é da ordem de 7% da quantidade queimada nos cerrados.

A quantidade de CO emitido nas queimadas acima, pode ser estimada seguindo-se o procedimento padrão. Para tal multiplica-se a massa seca pelo fator 0,45 obtendo-se a massa equivalente de carbono, ou em termos de massa de CO₂, multiplica-se ainda pelo fator 44/12 (Seiler & Crutzen, 1980). Observa-se que 10% da massa de carbono corresponderá, em média, à massa de CO (Crutzen et al., 1985). As queimadas dos canaviais tem, portanto, o potencial de liberar para a atmosfera uma quantidade de 0,8 Mt de CO por ano, da ordem de 0,3 Mt somente no Estado de São Paulo.

A contribuição das queimadas do Cerrado para a concentração de O₃ observada sobre os canaviais segue o mesmo raciocínio do caso do CO. Na Fig. 9a (Fogo I), tem-se a contribuição de O₃ produzido no local, mais o proveniente do Cerrado. A Fig. 9b mostra a contribuição principalmente das queimadas de cana-de-açúcar, e em 9c tem-se um perfil típico devido às queimadas do Cerrado.

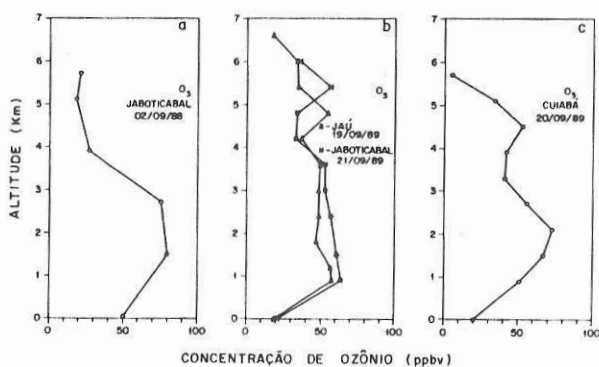


Figura 9. Perfis verticais de ozônio obtidos durante as estações secas de 1988 e 1989 realizados respectivamente em: a) Jaboticabal, dia 2 de setembro de 1988, b) Jaú, dia 19 de setembro de 1989 e c) Cuiabá, dia 20 de setembro de 1989.

Figure 9. Ozone vertical profiles obtained during the dry seasons of 1988 and 1989, respectively; a) Jaboticabal, September 2, 1988; b) Jaú, September 19, 1989 and c) Cuiabá, September 20, 1989.

Os perfis de ozônio mostrados na Fig. 9 mostram uma característica comum que é a diminuição na sua concentração a partir de aproximadamente 1 km de altitude para baixo, o que identifica o solo como um sumidouro para este gás. Entre aproximadamente 1 e 3,5 km de altitude, há um pico no perfil de ozônio devido a dois processos principais: produção fotoquímica local ou transporte de cima para baixo, ou ambos. Abaixo de 3,5 km, o excesso de concentração de O₃ em

relação à estação chuvosa, varia de 0 a 50 ppbv.

Durante a estação seca ocorre, em toda a região central do Brasil, uma subsidência que dificulta a mistura das camadas de ar mais baixas com a troposfera livre, como pode ser observado pelo gráfico de CO, Fig. 6 nos Projetos I e III, quando acima de cerca de 3,5 km de altitude tem-se níveis de concentração mais baixos, característicos de uma troposfera livre em que ainda não há sinais de queimadas.

Para os três perfis obtidos no Fogo III, Figs. 9b e 9c, observa-se um segundo pico na concentração de ozônio, acima de aproximadamente 4 km de altitude, devido a transportes de massas de ar.

Excursão à Cuiabá

Durante a época da seca, de junho a setembro, ocorrem queimadas sistemáticas no Cerrado, seja para limpeza e plantio, renovação do pasto, ou por acidente. Durante este mesmo período ocorrem também as queimadas da região Amazônica cujo ar pode em parte ser transportado para a região do Cerrado. A Fig. 10 mostra a localização de Cuiabá (15°30'S, 56°W) em pleno Cerrado brasileiro. O Cerrado brasileiro ocupa cerca da quinta parte do território nacional predominando nos Estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Tocantins e aparecendo na Bahia, Minas Gerais e São Paulo. A vegetação é caracterizada essencialmente por árvores pequenas (3 a 6 m de altura), com troncos retorcidos e vegetação rasteira, arbustos e capim.

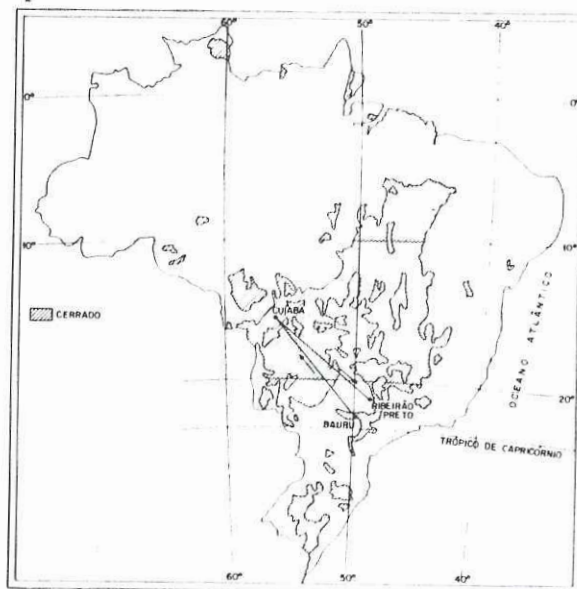


Figura 10. Mapa do Brasil mostrando as regiões de Cerrado brasileiro, sombreado, e as trajetórias de ida, de Bauru a Cuiabá, e volta para Ribeirão Preto.

Figure 10. Map of Brazil showing the Cerrado region, hatched, and the flight track from Bauru to Cuiabá, and back to Ribeirão Preto.

Com o objetivo de analisar qual a influência das queimadas do Cerrado sobre as regiões canavieiras, foram realizados nos dias 19 e 20 de setembro de 1989, vôos em direção a, e sobre a região de Cuiabá. Na viagem de ida entre Bauru e Cuiabá (dia 19 de setembro de 89), o vôo foi realizado em patamares de 100 km de extensão, com duração de 10 minutos, entre 4500 e 10500 m de altitude, em intervalos de 2000 m. Ao todo foram nove patamares nos quase 1200 km percorridos, mostrados na Fig. 11a1. O objetivo destes patamares era o de verificar qual a variação da concentração dos gases CO, O₃ e CO₂ dentro da camada de mistura e com a penetração no Cerrado. Na volta de Cuiabá para Bauru o avião manteve-se a uma altitude constante de 9000 m, devido à total falta de visibilidade produzida pelo "smog" fotoquímico. As Figs. 11b,c,d mostram respectivamente as concentrações de CO e CO₂ nos percursos de ida e volta, e O₃ apenas na ida.

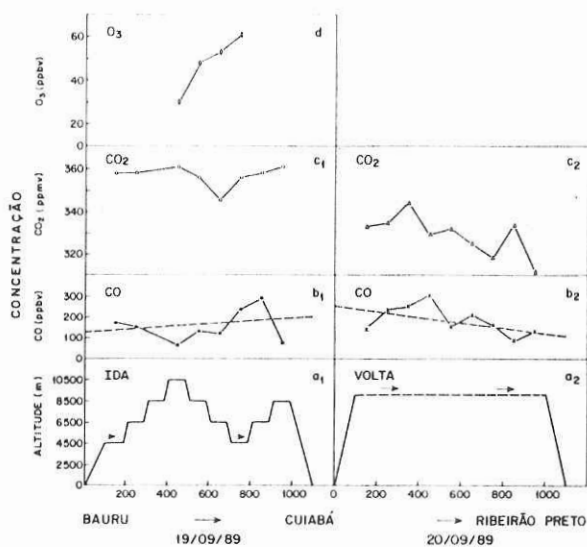


Figura 11. Esquema mostrando os trajetos de ida (a1), entre Bauru e Cuiabá, realizado em patamares de aproximadamente 100 km de extensão entre 4500 e 10500 m de altitude com intervalos de 2000 m, e volta (a2) à altitude constante de 9000 m. Acima tem-se os gráficos das concentrações dos gases CO (b1 e b2), CO₂ (c1 e c2) e O₃ (d) na ida.

Figure 11. Results of the flight from Bauru to Cuiabá (a1), made in steps of 100 km, approximately, between 4500 and 10500 m altitude with intervals of about 2000 m and back (a2) at 9000 m altitude. Concentrations are shown for CO (b1 and b2), CO₂ (c1 and c2) and O₃ (d) on the way to Cuiabá.

Verifica-se pelo gráfico da Fig. 11b1 para o CO, uma correlação com as subidas e descidas dos patamares: quando se sobe a concentração de CO diminui e quando se desce ela aumenta. Superposto a isto tem-se um visível aumento na concentração deste gás conforme se penetra no Cerrado acercando-se de Cuiabá, ou no trajeto de volta saindo do Cerrado. Grosseiramente, adaptando retas de regressão linear às Figs. 11b1 e b2, na ida e na volta, tem-se:

$$\text{CO} = 0,064 d + 130,9 \text{ (valor calculado para o trajeto de ida)}$$

e

$$\text{CO} = -0,13 d + 254,1 \text{ (valor calculado para o trajeto de volta)}$$

com CO em ppbv e d (distância do avião ao ponto de partida), em km, ou seja, na ida para a região das queimadas do Cerrado, a concentração de CO aumentou de 6,4 ppbv a cada 100 km e na volta caiu de 254 ppbv em Cuiabá para 111 ppbv em Ribeirão Preto. (Notar que as alturas amostradas são diferentes). Conforme mostrado na Fig. 6 e pela análise acima, a contribuição das queimadas do Cerrado sobre a região dos canaviais pode chegar a 50%, sendo este um limite superior. O CO₂ permaneceu praticamente constante na Fig. 11c1 porém na Fig. 11c2 observa-se uma nítida diminuição com a saída do Cerrado. A concentração de ozônio também aumentou com a penetração no Cerrado.

CONCLUSÕES

Descrevem-se medidas a bordo de avião, num total de seis vôos em altitudes variadas e sete perfis verticais em diferentes locais, dos gases ozônio, monóxido e dióxido de carbono na região canavieira e Cerrado, no final da estação chuvosa de 1989 (junho) e nos períodos secos de 1988 e 1989 (setembro).

As queimadas representam uma intensa fonte de CO e CO₂ enquanto que o ozônio é produzido fotoquimicamente na atmosfera. O aumento na concentração destes gases variou de três a seis vezes durante as queimadas com relação a estação chuvosa quando a atmosfera está limpa devido a ocorrência de chuvas e pela ausência de queimadas.

Durante o primeiro experimento em setembro de 1988, através da análise de trajetórias, identificou-se massas de ar provenientes do cerrado que contribuíram, neste caso, com cerca de 30 a 50% dos poluentes sobre os canaviais. Em setembro de 1989 os ventos foram provenientes do oceano podendo-se, deste modo,

avaliar a ação das queimadas locais. A produção de monóxido de carbono durante as queimadas de cana-de-açúcar é de 0,8 Mt por ano que representam 7% da produção deste gás pelas queimadas do Cerrado. De acordo com Kirchhoff (1990), a produção global de CO por queima de biomassa é de 62,8 Mt por ano sendo, portanto, 1,3% devido às queimadas de canaviais brasileiros. Devemos acrescentar finalmente, que embora haja uma forte liberação de CO₂ pelas queimadas de palha de cana, este CO₂ não contribui a médio e longo prazo ao efeito estufa, pois uma quantidade equivalente deste gás é retirado da atmosfera via fotossíntese durante o crescimento do canavial no ano seguinte.

AGRADECIMENTOS

Somos gratos aos colegas Maria Angélica de Jesus, responsável pelas análises das amostras e redução

de dados; à participação nos trabalhos de campo e supervisão técnica dos engenheiros Luiz Fernando Ribeiro e Ailton Takashima, e dos meteorologistas Dr. Pedro Dias, o qual auxiliou nas análises de trajetórias de massas de ar, e Paulo Etchichury. Aos pilotos Pedro Celso e Luiz Monteiro e ao técnico Amauri Villarino; ao apoio dos membros do Instituto Meteorológico de Bauru, em particular ao Professor Calheiros, e do Instituto de Física da UNESP - Campus de Jaboticabal, em particular aos Drs. Romísio André e Clóvis Volpe; às informações e trocas de idéias com o Dr. Alberto Setzer, Antonio Formaggio, e Marcos Pereira. Ao precioso apoio dos demais membros do grupo de ozônio Rômulo Barreira e Yukitaka Nakamura, e ao Adilson Palone do INPE-Cuiabá. O presente trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que mais uma vez desempenhou o seu papel exemplarmente.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M.L. - 1985 - Previsores sinótico-meteorológicos para a dispersão de poluentes na região da Grande São Paulo, SP. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 131 p., São José dos Campos, SP.
- BOLETIM AGROCLIMATOLÓGICO - 1988 - Brasília, 22, n.ºs. 1 a 12.
- BOLETIM AGROCLIMATOLÓGICO - 1989 - Brasília, 2, n.ºs. 1 a 12.
- COUTINHO, L.M. - 1980 - As queimadas e seu papel ecológico. *Brasil Florestal*, 44: 7-23.
- CRUTZEN, P. - 1983 - Atmospheric interactions - homogeneous gas reactions of C, N, and S containing compounds. In: *Scope* (B. Bolin & R. Cook, eds.), John Wiley & Sons, 67-114.
- CRUTZEN, P.J., DELANY, A.C., GREENBERG, J., HAAGENSEN, P., HEIDT, L., LUEB, R., POLLOCK, W., SEILER, W., WARTBURG, A. & ZIMMERMAN, P. - 1985 - Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. *J. Atmosph. Chem.*, 2: 233-256.
- DELANY, A.C., HAAGENSEN, P., WALTERS, S., WARTBURG, A.F. & CRUTZEN, P.J. - 1985 - Photochemically produced ozone in the tropical emission from large-scale tropical fires. *J. Geophys. Res.*, 90: 2425-2429.
- FERNANDES, A.C. - 1988 - A utilização da queimada na colheita da cana-de-açúcar. COPERSUCAR, São Paulo, CTAG-1, 17 pp.
- FISHMAN, J. - 1985 - Ozone in the troposphere. In *Ozone in the free atmosphere* (R.C. Whitten & S.S. Prasad, eds.), Van Nostrand Reinhold, 161-194.
- FOSTER, D.H., INKERMANN, P.A. & MCNEIL, K.E. - 1980 - Studies on cane deterioration in Australia. In *Proc. of the 17th Int. Society of Sugar Cane Technology*, 2204-2220.
- GREENBERG, J.P., ZIMMERNAN, P., HEIDT, L. & POLLOCK, W. - 1984 - Hydrocarbons and carbon monoxide emissions from biomass burning in Brazil. *J. Geophys. Res.*, 89: 1350-1354.
- IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - 1975/1989 - Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa mensal de previsão de acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1990 - Biomass burning in the Brazilian Amazon region. *Biomass Burning Conference*, Williamsburg, VA, 19-23.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1988a - Surface ozone measurements in Amazonia. *J. Geophys. Res.*, 93: 1469-1476.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1988b - Variações temporais da concentração de ozônio de superfície. *Rev. Bras. Geof.*, 1: 3-8.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. & MARINHO, E.V.A. - 1988 - A concentração de monóxido de carbono (CO) no ar como parâmetro de pureza. *Rev. Bras. Geof.*, 1: 9-16.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. & MARINHO, E.V.A. - 1989 - A survey of continental concentrations of atmospheric CO in the Southern Hemisphere. *Atmospheric Environment*, 23: 461-466.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., MARINHO, E.V.A., DIAS, P.L.S., CALHEIROS, R., ANDRÉ, R. & VOLPE, C. - 1989a - O₃ and CO from burning sugar cane. *Nature*, 339: 264.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., SETZER, A.W. & PEREIRA, M.C. - 1989b - Biomass burning in Amazônia: seasonal effects on atmospheric O₃ and CO. *Geophys. Res. Lett.*, 16: 469-472.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., MARINHO, E.V.A., DIAS, P.L.S., PEREIRA, E.B., CALHEIROS, R. & ANDRÉ, R. - 1991 - Enhancements of CO and O₃ from burning in sugar cane fields. *J. Atmosph. Chem.*, 12: 87-102.

- LOGAN, J.A. – 1985 – Tropospheric ozone: seasonal behavior, trends and anthropogenic influence. *J. Geophys. Res.*, **90**: 10463-10482.
- MENDONÇA, F.J., BATISTA, G.T. & TARDIN, A.T. – 1989 – Projeto CANASATE: sensoriamento remoto aplicado ao levantamento da cultura canavieira. INPE-4902-PRE/1503, 17 pp.
- RAISON, R.J., WOODS, P.V., JAKOBSEN, B.F. & BARY, G.A.V. – 1986 – Soil temperatures during and following low-intensity prescribed burning in a *Eucalyptus pauciflora* forest. *Aust. J. Soil Res.*, **24**: 33-47.
- SEILER, W. & CRUTZEN, P.J. – 1980 – Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic Change*, **2**: 207-247.
- SILLMANN, S., LOGAN, J.A. & WOFSEY, S.C. – 1989 – The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in region ozone episodes. Aceito para publicação no *J. Geophys. Res.*

Versão recebida em: 09/11/90
Versão revista e aceita em: 06/05/91
Editor Associado: M.A.F. Silva Dias