

ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DO CO₂ ATMOSFÉRICO EM ÁREA DE PASTAGEM NA REGIÃO AMAZÔNICA

Rosiberto Salustiano da Silva Júnior¹, Marcos Antônio Lima Moura², Franz X. Meixner³, Robert Kormann³, Roberto Fernando da Fonseca Lyra² e Manoel Ferreira do Nascimento Filho²

Recebido em 2 dezembro, 2004 / Aceito em 14 janeiro, 2005
Received December 2, 2004 / Accepted January 14, 2005

ABSTRACT. Carbon dioxide (CO₂) mixing ratios were continuously measured at a pasture site (Fazenda Nossa Senhora Aparecida) near Ouro Preto D'Oeste/RO during the period 15 April to 21 May 1999. This period corresponds to the transition between the wet to the dry season in this region. Photosynthesis by the vegetation of the pasture is the main sink for atmospheric CO₂ during daylight. During nighttime soil and plant respiration are a source for atmospheric CO₂. Our results show a marked diurnal cycle of mean CO₂ mixing ratios. Mean mixing ratios above 500 ppmv are reached between 23:00 and 6:00 local time with a maximum of 533 ± 106 ppmv around 02:00. Values stay well below 400 ppmv between 9:00 and 17:00 and reach a minimum of 367 ± 8 ppmv around 15:00. Individual measurements performed during nights with low wind speeds especially show elevated CO₂ mixing ratios which might reach up to 800 ppmv.

Keywords: CO₂ concentration, pasture, Amazonia.

RESUMO. Medidas de concentração de dióxido de carbono (CO₂) foram realizadas em uma área de pastagem no município de Ouro Preto do Oeste/RO (Fazenda Nossa Senhora Aparecida), no período de 15/04 – 21/05/1999, período característico na região como sendo de transição entre a estação chuvosa para a seca. O período diurno é o principal responsável pelo consumo de CO₂ devido à realização da fotossíntese pelas plantas, enquanto no período noturno a respiração das plantas e dos microorganismos vivos responsáveis pela decomposição da matéria morta, liberam CO₂ para atmosfera. As concentrações de CO₂ tiveram valores acima de 500 ppmv entre 23:00 e 06:00 horas com um máximo de 533 ± 106 ppmv aproximadamente às 02:00 horas, como também apresentaram valores mínimos abaixo de 400 ppmv entre 9:00 e 17:00 horas com mínimo de 367 ± 8 ppmv aproximadamente às 15:00 horas. Foram feitas várias comparações entre a concentração de CO₂ e algumas variáveis meteorológicas na busca de explicações para o ciclo diário da concentração de CO₂, onde existe uma relação entre e a baixa velocidade do vento noturno e a concentração de CO₂ que alcança valores superiores a 800 ppmv.

Palavras-chave: Concentração de CO₂ atmosférico, pastagem, Amazônia.

¹Prof. Ms. do Depto. de Solos, Engenharia e Economia Rural/CECA/UFAL, Campus Delza Gitai, BR-104 Km 85 – Rio Largo – Alagoas – 57020-720 – E-mail: rosibertojunior@ig.com.br

²Prof. Dr. do Depto. de Meteorologia/CCEN/UFAL, Campus A.C. Simões, BR-104 - km 14 - Tabuleiro – Maceió – Alagoas - 57072-970 – Tel: (82) 214-1365 / 1368; Fax: (82) 214-1615 – E-mails: malm@ccen.ufal.br; rfl@ccen.ufal.br; mfn@ccen.ufal.br

³Dr. do Depto. de Bioquímica, Instituto Max Planck de Química – D-55020 – Mainz – Alemanha – Tel: (+49 6131) 305-493 / 491 / 438. Fax: (+49 6131) 305-388; – E-mails: meixner@mpch-mainz.mpg.de; kormann@mpch-mainz.mpg.de

INTRODUÇÃO

Do início da era industrial, em meados do século XVIII, até a atualidade, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera aumentou em média de 280 ppmv (partes por milhão por volume) para aproximadamente 370 ppmv (Keeling & Whorf, 1999). Atualmente, cerca de 40% das emissões antropogênicas ainda permanecem na atmosfera (Tans et al., 1996; Conway et al., 1994). Uma forma de medir a evolução da concentração de CO₂ nos últimos 400 mil anos foi por meio de análises das bolhas de ar contidas em testemunho de gelo na Antártica, onde se destaca o forte aumento da concentração de CO₂ no Século XX (IPCC, 1996).

Devido à sua grande importância por absorver radiação na faixa do infravermelho o CO₂, juntamente com o vapor d'água (H₂O), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), entre outros gases traços, regula a saída de radiação infravermelha para o espaço (termorregulador) na faixa conhecida como "Janela Atmosférica" (entre 8 à 12 μm). Então, alterações na concentração de CO₂ podem implicar, teoricamente, num aquecimento ou resfriamento global. Krupa (1997) descreveu que a contribuição relativa do CO₂ para o efeito estufa é de 60%, enquanto que o seu tempo de permanência na atmosfera varia de 50 – 500 anos.

O CO₂ atmosférico é absorvido pelas plantas clorofiladas e bactérias quimiossintetizantes onde é utilizado para a formação de compostos orgânicos. Parte do CO₂ volta diretamente à atmosfera pela respiração das plantas. Durante o dia a planta absorve CO₂ e libera O₂ por meio da fotossíntese, mas durante a noite as plantas deixam de realizar fotossíntese e passam a dar contribuição para o aumento da concentração em seu processo respiratório (absorve O₂ e libera CO₂) (Santos, 1999). Porém, o equilíbrio não é perfeito e o resultado final dependerá de outros processos, que irão controlar uma produção ou mesmo absorção líquida de CO₂, por exemplo, as queimadas estão relacionadas com aumento na concentração de CO₂ e reflorestamento com diminuição da concentração de CO₂, quando se refere às regiões florestais.

A fixação de CO₂ por fotossíntese pelas plantas converte a energia solar (*Radiação Fotossinteticamente Ativa – RFA*) em energia química



que é utilizada para a manutenção e crescimento da vegetação terrestre e aquática, sustentando a cadeia trófica, além de diminuir a concentração de CO₂ devido a fixação realizada pelas folhas (Figura 1). Isso acontece por meio da variação na abertura estomática na superfície foliar que controla a liberação da umidade contida na vegetação, assim como a entrada ou saída do

CO₂ presente na atmosfera.

Estudos de fisiologia vegetal relacionando a diminuição da quantidade de água no solo e alterações na assimilação de CO₂ pelas plantas (Epron & Dreyer, 1993; Kubiske & Abrams, 1994) mostraram que a redução nas taxas de assimilação de CO₂ e da condutância estomática estão associadas ao baixo potencial de água nas folhas ou ao reduzido conteúdo de água no solo. A água dentro da planta percorre um longo caminho até chegar as folhas, iniciado nas raízes depois transportada pelos vasos de xilema até as folhas, onde ocorrem os processos físico-químicos (fotossíntese) e a transpiração da planta. Tardieu & Davies (1992) relataram evidências experimentais indicaram que o déficit de umidade no solo inicia uma ação hormonal induzindo as células guarda fechar o estômato (célula guarda – responsável pela abertura e no fechamento do estômato) para reter água limitando, dessa forma, a absorção de carbono.

Entretanto, estudos realizados em florestas (Edwards & Solins, 1973) revelam que proporcionalmente existe uma produção diferencial de CO₂ entre raízes (35%), liteira (48%) e solo (17%), mostrando que grande parte da respiração do solo provém da decomposição da matéria orgânica (Raich & Schlesinger 1992). Assim, uma maior concentração de CO₂ estaria relacionada com uma maior atividade dos microorganismos responsáveis pela decomposição dessa matéria orgânica.

O CO₂ produzido pela respiração de raízes, microorganismos, fauna do solo e pela oxidação química dos compostos de carbono em solos de florestas tropicais úmidas, podem representar mais de 80% de todo CO₂ emitido pelo ecossistema (Meir et al., 1996). Segundo Sotta (1998) essa taxa de transferência de CO₂ (emissão de CO₂ para a atmosfera por intermédio do solo, microorganismos, fauna e processos químicos) é controlada por: taxa de produção no solo, gradientes de temperatura no solo e na atmosfera; concentração na interface solo-atmosfera, propriedades físicas do solo, e flutuações da pressão atmosférica do ambiente que está sendo analisado.

O reflorestamento resulta numa maior absorção de gás carbônico, pois a floresta em crescimento está agregando matéria orgânica. Já as queimadas liberam gás carbônico pela oxidação da biomassa. As plantas jovens precisam fixar um grande volume de CO₂ para poder sintetizar as moléculas orgânicas que são a matéria-prima de seu crescimento, já para plantas maduras o consumo de oxigênio na respiração tende a se igualar ao total produzido na fotossíntese (Rios, 2002).

A queima e a decomposição de biomassa oriunda do desmatamento são os principais processos responsáveis pelo aumento da concentração de CO₂ sobre a região amazônica. Estudos reali-

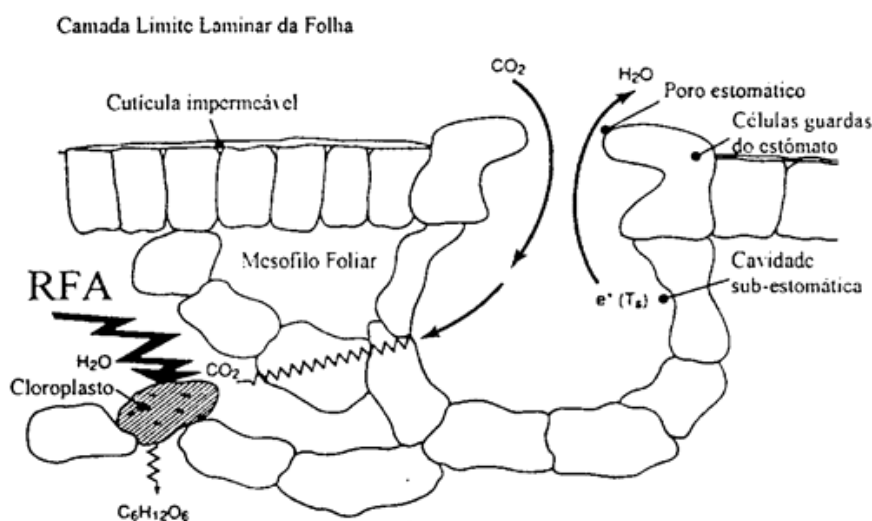


Figura 1 – Esquema da fixação de CO_2 pelas folhas das plantas. (Fonte: Costa, 2000).

Figure 1 – Scheme for CO_2 uptake by plant foliage (according to Costa, 2000).

zados por Oliveira & Fisch (2000) comprovam que os Estados de Rondônia, Mato Grosso e Pará, são apontados como os primeiros em número de focos de incêndio no Brasil. Com base nessa informação a região de estudo foi escolhida tendo como objetivo principal de determinar o ciclo horário médio da concentração de CO_2 para uma área de pastagem na Amazônia, durante o projeto LBA/EUSTACH (Experimento de Grande Escala da Biosfera – Atmosfera na Amazônia / European Studies on Trace Gases and Atmospheric Chemistry), no período correspondente à transição da estação chuvosa para a seca (abril / maio), como também associar o referido ciclo a algumas variáveis meteorológicas.

METODOLOGIA

Os dados foram coletados durante o período de 15/04 a 21/05/1999, quando estava sendo realizado o projeto LBA-EUSTACH instalado no mesmo sítio experimental do antigo projeto ABRACOS (Fazenda Nossa Senhora Aparecida) localizada em $10^\circ 46'S$ e $62^\circ 21'W$, a 267 m acima do nível médio do mar, que é uma área de pastagem na região amazônica, no município de Ouro Preto D'Oeste/Rondônia/Brasil. A floresta em Rondônia tem sido progressivamente desmatada durante os últimos 35 anos. A Fazenda Nossa Senhora Aparecida (FNS) teve seu primeiro desmatamento utilizando fogo em 1977, e desde 1991 tem uma vegetação considerada homogênea e de um gramado perene (Andreae et al., 2002), ou seja, é uma fazenda destinada a criação bovina, apresentando uma vegetação de porte baixo (pastagem) sendo esta paisagem predominante não só na FNS como também

nas suas proximidades.

As medidas de concentração de CO_2 foram obtidas usando o instrumento "Tunable Diode Laser Spectrometer" (TDLs), cuja mangueira de sucção da amostra estava instalada a 4,5 m do solo, constituído por uma fonte de Laser "Diode" e uma célula de Herriott (Herriott & Schulte, 1965), que tem a função de garantir a velocidade de troca dos gases por meio de uma série de reflexões internas com utilização de espelhos. O princípio de funcionamento consiste no bombeamento da amostra de gás para o interior da célula de Herriott onde, a concentração do gás é mensurada através da absorção óptica do raio laser. Antes de o raio laser ser lançado no interior da referida célula, o raio é dividido de modo que uma parte incida na célula detectora de referência e a outra parte é lançada para o interior da célula de Herriott, na qual o raio laser sofre múltiplas reflexões para que haja um maior contato do raio laser com o gás, até que seja feita a medida pela célula detectora. Então, por meio da comparação das medições realizadas pelas duas células detectoras faz-se a medida da concentração de CO_2 . Maiores detalhes podem ser encontrados em Kormann (1997) e em Silva Júnior (2003).

Para medir a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) foi utilizado o equipamento PAR Sensor – modelo LI-190SZ (LI-COR Corp., Lincoln, Nebraska, EUA), instalado a 10 m de altura do solo. A unidade deste equipamento é $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, mas foi convertido para $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ de acordo com Pearcy et al. (1989) por intermédio da seguinte relação:

$$1\text{W}\cdot\text{m}^{-2} = 4,6\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$$

As medidas de precipitação foram feitas a partir de um pluviômetro de balsa tipo DRG3 (Didcot Instruments Co Ltd, Abingdon, UK) constituído de um cilindro de aço inoxidável, com 200 mm de diâmetro, instalado próximo a superfície. As especificações técnicas indicam uma resolução de leitura de 0,1 – 0,2 mm.

Para as medidas de temperatura e umidade do ar, foi utilizado um Psicrômetro aspirado, com precisão de 0,1 °C que é formado por um conjunto composto por um pequeno ventilador de sucção e dois termômetros de resistência de platina, sendo um seco e outro umedecido, desenvolvido pelo Instituto de Hidrologia (IH, Wallingford, Grã-Bretanha - UK), instalado a 4,5 m de altura do solo.

Já para as medidas de velocidade e direção do vento, foi utilizado um anemômetro horizontal de concha metálica de desenho simples e robusto, fornecendo medidas de velocidade horizontal do vento (em m s⁻¹), medidas de direção do vento indicado em graus (a partir do norte e sentido horário), fabricado pela Didcot Instruments (Abingdon, UK), instalados a 10 m de altura do solo. Para a classificação das direções do vento referenciadas aos pontos cardeais foi convencionado para este trabalho que os pontos cardeais seriam definidos com relação a intervalos de 45° de abertura.

O período de integração dos dados foi de 30 min, armazenados em um sistema de aquisição de dados CR10 (Campbell Scientific, Shephed, UK) durante o período experimental de 15/04 a 21/05/1999.

Foram feitas médias horárias para determinação do ciclo de concentração de CO₂, comparando visualmente com as variáveis meteorológicas ou mesmo com o auxílio de regressões lineares dos dados coletados no mesmo instante de medida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

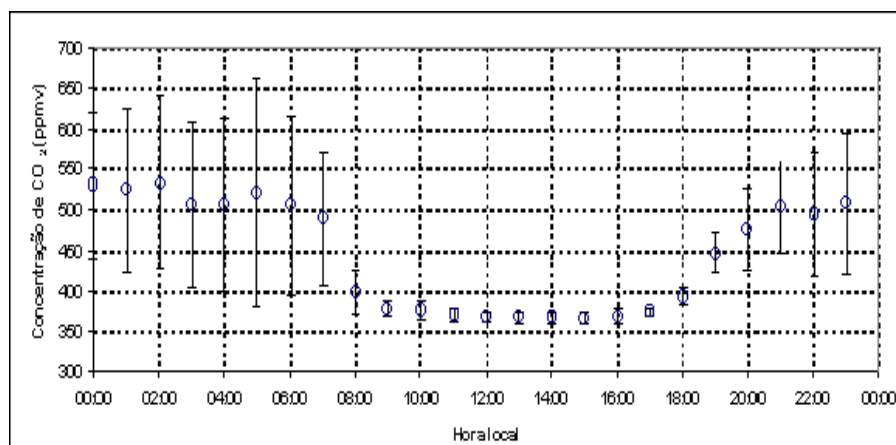
O ciclo médio horário da concentração de CO₂ (Figura 2) mostra que o máximo valor médio horário foi de 533 ± 106 ppmv às 02:00 horas, enquanto que o valor mínimo foi de 367 ± 8 ppmv ocorrido às 15:00 horas, com uma amplitude de 165 ppmv. Valores semelhantes também foram encontrados por Costa (2000) ao estudar concentração de CO₂ em uma área florestada do Estado de Rondônia. Naquele Estado, comparando período seco com chuvoso, obteve um máximo de 418 ppmv às 07:00 horas e um mínimo de 363 ppmv às 12:00 horas, com amplitude de 55 ppmv, para o período seco. Já para o período chuvoso as concentrações máximas e mínimas diminuíram para 394 ppmv e 351 ppmv respectivamente, com diferença entre os extremos de 43 ppmv. San-

tos (1999) encontrou para a mesma área florestada do Estado de Rondônia, concentração máxima de 470 ppmv e mínima de 360 ppmv, o que mostra uma amplitude de 110 ppmv. Já Grace et al. (1996) observaram valores variando entre o máximo de 453 ppmv e o mínimo de 357 ppmv, com amplitude de 96 ppmv, mostrando que os valores de concentração de CO₂ medidos sobre áreas de pastagens se aproximam dos medidos em áreas florestadas, porém com maior variabilidade diurna.

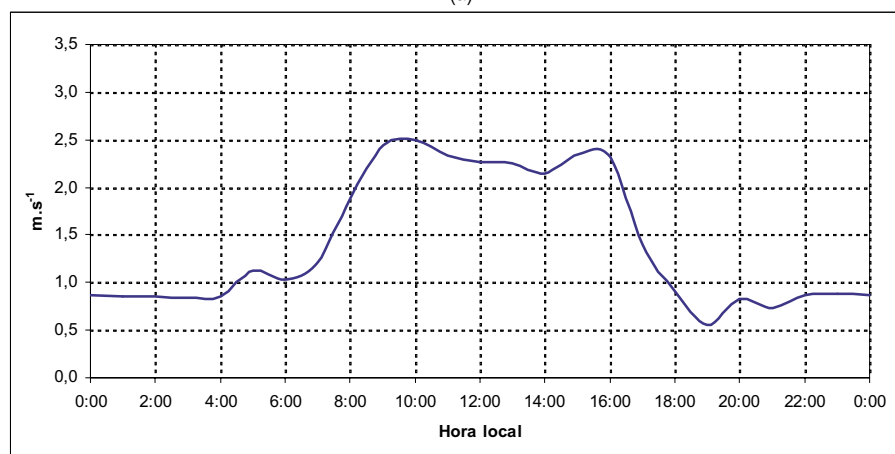
O primeiro fato que chama atenção é que, após o nascer do sol, a concentração diminui rapidamente até atingir uma certa estabilização por volta das 9:00 horas. A partir deste horário ela varia pouco voltando a subir aproximadamente às 18:00 horas. A mistura no interior da camada limite convectiva (CLC) implica na diminuição da concentração de CO₂, durante o dia. No entanto, o valor médio diurno encontrado (386 ppmv) é um pouco acima do esperado. Estudos observacionais realizados na região mostraram que a quebra da inversão noturna só ocorre por volta das 9:00 horas (Fisch, 1996; Leite, 2004; Silva 2005). É também comum o surgimento de uma camada estável (início camada limite noturna "CLN") a partir das 17:00 horas, principalmente nas estações de transição (Leite, 2004). Finalmente, o período de existência plena da CLC se estende de 9:00 às 17:00 horas. Como a média foi feita entre o nascer e o por do sol (6:00 a 18:00), as concentrações correspondentes aos períodos de transição foram incluídas na média diurna implicando em um valor mais alto. Como também foi constatado por Silva Junior (2003) que este equipamento (TDLS) faz medições 5% maiores do que os equipamentos comerciais utilizados para medidas de CO₂ na Amazônia.

Também é importante salientar que após o pôr do Sol houve liberação de CO₂ para a atmosfera, não de forma instantânea, mas no decorrer do período noturno, provando que a pastagem deixou de consumir para liberar CO₂ pela ausência de luz solar, além do aumento natural da umidade relativa do ar e diminuição da temperatura do ar, que propicia não só uma maior respiração das raízes, como também dos microorganismos responsáveis pela decomposição do material orgânico, fauna do solo e pela oxidação química dos compostos de carbono, podendo segundo Meir et al. (1996) representar mais de 80% de todo CO₂ emitido pelo ecossistema. Obviamente que isso tudo associado a uma intensa diminuição da turbulência atmosférica noturna para produzir esta grande dispersão dos valores noturnos em relação ao diurno, o que pode ser constatado também com a Figura 2b, onde a velocidade média do vento horizontal noturno não ultrapassa 1 m s⁻¹.

A análise da RFA em conjunto com a concentração de CO₂, confirma a esperada relação inversa entre estas variáveis pois



(a)



(b)

Figura 2 – Ciclo médio horário da concentração de CO₂, com os respectivos desvios padrão (a), e ciclo médio horário da velocidade do vento (b), durante o período entre 15/04/1999 a 21/05/1999.

Figure 2 – (a) Daily cycle of the CO₂ concentration (hourly averages and standard deviation) and (b) average daily cycle of the wind speed during the period 15/04 to 21/05/1999.

um aumento da RFA implica numa diminuição na concentração de CO₂, como é mostrado na Figura 3. Do nascer do sol, por volta das 06:00 horas até às 12:30 horas o valor da RFA aumenta de 18,23 para 318,84 W m⁻², enquanto a concentração de CO₂ diminui de 530 ppmv às 06:00 horas para 380 ppmv às 12:30 horas. Pode-se atribuir a forte diminuição da concentração de CO₂ durante o período diurno a um aumento da mistura turbulenta do ar próximo ao solo com a troposfera. Após às 17 horas a concentração de CO₂ aumenta fortemente justamente quando a RFA diminuiu. Logo assim, entre 06:00 – 12:00 horas ocorre um consumo crescente de CO₂ enquanto entre 12:00 – 17:00 horas o consumo é decrescente. Durante o período noturno a concentração aumenta porque as plantas deixam de realizar fo-

tossíntese.

Por conseqüência da grande quantidade de irradiância incidente na superfície terrestre no período diurno evidencia-se, em concordância com a RFA, que a temperatura do ar também apresenta uma relação inversa com a concentração de CO₂, onde os máximos valores da concentração de CO₂ e temperatura do ar são de 547 ppmv (às 07:00 horas) e 28°C (às 13:30 horas) respectivamente e mínimos de 360 ppmv (às 14:30 horas) e 21,6°C (às 06:00 horas) respectivamente. Esta relação foi encontrada também por Hensen et al. (1996). Os altos valores de temperatura do ar ocorrem no momento em que a concentração de CO₂ apresenta seus valores mínimos, existindo uma relação inversa entre ambas variáveis.

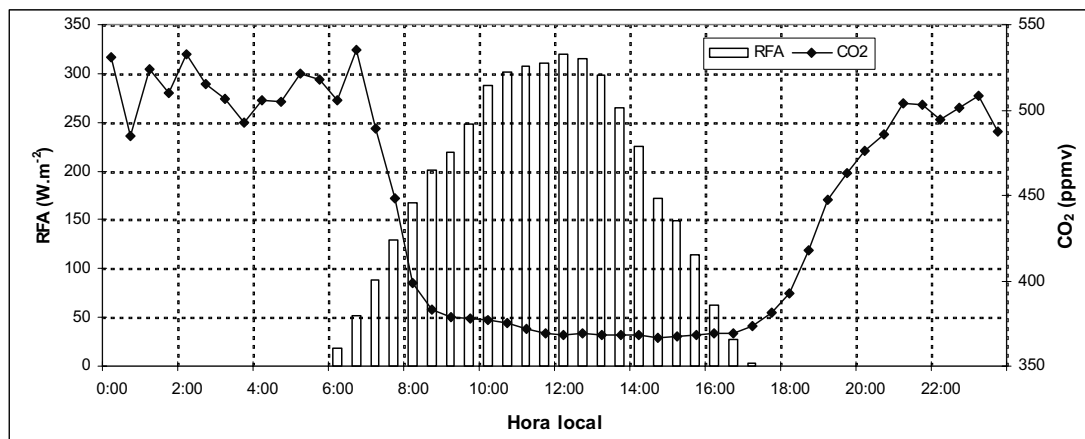


Figura 3 – Ciclo médio da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) ($W.m^{-2}$) e concentração de CO₂ (ppmv) para o período de levantamento de dados (15/04 – 21/05/99).

Figure 3 – Daily averages of the photosynthetically active radiation (RFA = PAR) ($W m^{-2}$) and CO₂ concentration (ppmv) for the period 15/04 – 21/05/1999.

Uma das consequências da variabilidade da RFA é notada sobre as variáveis velocidade do vento junto com o aumento ou diminuição na concentração de CO₂, já que ventos fortes estão associados a uma maior dispersão de CO₂ e esta relação é comprovada na Figura 4, que mostra que as altas concentrações de CO₂ estão associadas às menores velocidades do vento. Tanto que para velocidades abaixo de $1,5 m s^{-1}$ tem-se um intervalo de concentrações entre 350 – 800 ppmv, enquanto que para valores acima de $1,5 m s^{-1}$, tem-se concentrações mais baixas com intervalo entre 350 – 400 ppmv. Ocorre uma grande variação nas medições realizadas durante o período noturno, por consequência de estarmos considerando uma medição pontual que é feita no transcorrer dos 38 dias, no qual os turbilhões (que são movimentos verticais do vento) transportam o CO₂ com diferentes velocidades e quantidades. Outra possível explicação seria o fato de que no período noturno, as plantas deixam de realizar fotossíntese (forte diminuição no consumo de CO₂), no qual a concentração de CO₂ já existente na atmosfera é adicionada a novas emissões noturnas, que em conjunto com o confinamento do ar devido a diminuição da altura da camada limite, faz com que sejam medidos maiores valores de concentração de CO₂, onde esses altos valores ficam sujeitos as variações da intensidade do vento próximo ao ponto de medição. A resposta dos altos valores de concentração de CO₂ são mais sensíveis a presença ou ausência de vento. É interessante ressaltar que a grande dispersão que ocorre com baixas velocidades do vento está possivelmente associada a explicação anterior de que no período noturno ocorre não só uma maior liberação de CO₂ pelo conjunto planta-solo,

como também uma menor velocidade do vento pelo fato de ocorrer resfriamento intenso no sistema Terra-Atmosfera.

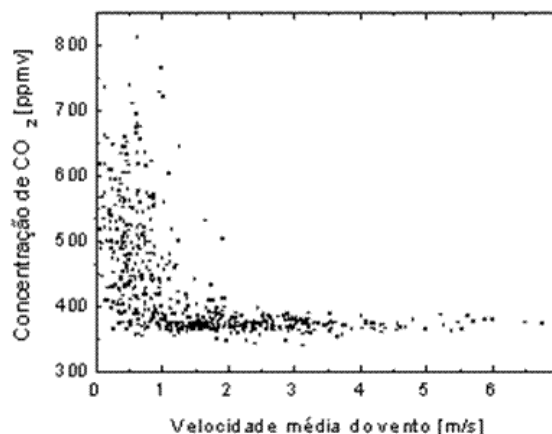


Figura 4 – Concentração de CO₂ (ppmv) em função da velocidade do vento ($m s^{-1}$) durante o período 15/04 – 21/05/1999.

Figure 4 – Correlation between CO₂ concentration (ppmv) and wind speed ($m s^{-1}$) during the period 15/04 to 21/05/1999.

Pode-se associar também a concentração de CO₂ com a direção do vento, em relação a fontes difusas ou pontuais de emissão de CO₂, pois dependendo de onde o vento está soprando poderá ocasionar um aumento ou diminuição na concentração, o que já foi mostrado por Moura et al. (2004) quando associaram direção do vento e concentração de ozônio (O₃) na região central da Amazônia. A distribuição da frequência percentual da direção do vento mostra uma predominância de ventos de sul/oeste no período diurno (Figura 5a) e de sul/leste no período noturno

(Figura 5b), possivelmente isto estaria associado ao contraste térmico entre a floresta e pastagem ou configuração da topografia local. Possíveis fontes de emissão de CO_2 nestas duas direções predominantes em relação ao ponto de medida, podem influenciar nas medidas de concentração de CO_2 .

A Figura 6 (a) mostra que as concentrações médias para todas as direções do vento estiveram sempre em torno da média diurna das concentrações (386 ppmv), quando os ventos sopraram das direções 220° (sudoeste) e 290° (oeste) foram observados maiores concentrações médias de 439 e 432 ppmv, respectivamente, que é um pouco maior em comparação com a média geral das concentrações para todo o período experimental, que foi de 432 ppmv. Isso não é padrão para o período diurno, mostrando que a região situada nesta direção pode ser uma grande fonte de CO_2 . Enquanto isso, as fontes pontuais de emissão de CO_2 situadas na direção 300° , não exercem influências sobre as medidas de concentração de CO_2 , pelo fato de não ter havido ocorrências de vento nesta direção, já para outras direções, as concentrações de CO_2 se mantiveram próximo da média geral.

Durante o período noturno mostrado na Figura 6(b), foi possível observar o seguinte: (a) exceto para o intervalo de direções entre $180 - 200^\circ$, o restante das direções apresentaram valores da concentração acima da média geral, que foi de 432 ppmv; (b) para os intervalos entre $250 - 360^\circ$ e $0 - 20^\circ$ (oeste/noroeste/norte), as concentrações estiveram sempre acima não só da média geral, como também da média noturna das concentrações de CO_2 (482 ppmv), pode-se salientar que após às 18:00 horas, na direção de 270° , havia a presença aleatória de carros automotores os quais funcionaram como fonte pontual de CO_2 fazendo aumentar a concentração. Destaca-se altos valores durante o período noturno, quando os ventos sopram de 70° , apresentando concentração máxima de 622 ppmv, representando 44% acima da média geral e 29% acima da média noturna da concentração de CO_2 . Este alto valor pode ser explicado pela presença de uma casa, onde se utilizava de fogo a lenha, como também é a direção que está localizada a cidade de Ouro Preto do Oeste (14 km). Logo por estar a uma distância pequena e o período noturno ter como característica uma atmosfera estável, o instrumento conseguiu detectar essa fonte de CO_2 . Destaca-se também as direções entre $190 - 200^\circ$ (sul), onde as concentrações são mínimas com aproximadamente 405 ppmv, o que representa 6% abaixo da média geral e 16% abaixo da média noturna.

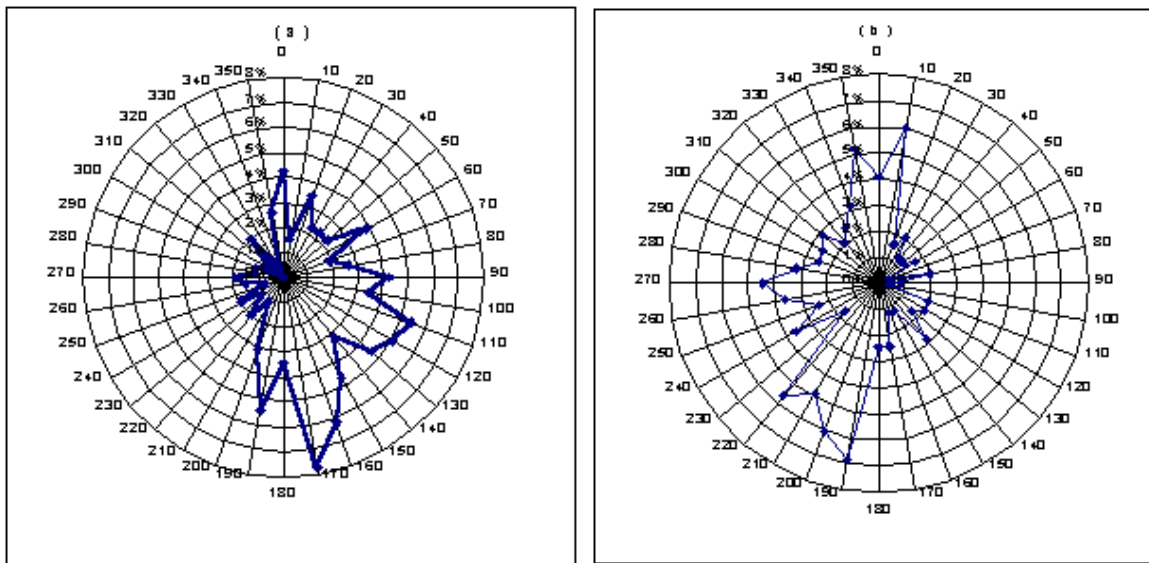
O efeito de um forte temporal noturno na concentração de CO_2 é demonstrado na Figura 7. Às 03:30 horas (hora local) do dia 14 de maio de 1999, três horas antes do início da precipitação

(às 05:30 horas; vê Figura 8) a velocidade do vento aumentou para mais de 2 m s^{-1} (Figura 8) e a concentração de CO_2 começa a diminuir fortemente dos atuais níveis de 550 ppmv. Com o início da precipitação (05:30 horas) e a ocorrência de velocidade do vento máxima (8 m s^{-1}), os níveis de concentração do CO_2 alcançados são surpreendentemente baixos (380 ppmv). Obviamente que estas concentrações de CO_2 são aproximadamente 100 ppmv mais baixas do que a correspondente taxa média para todo o experimento. Geralmente da meia-noite ao nascer do sol o CO_2 médio está acima de 480 ppmv, devido ao acúmulo de CO_2 liberado pelo solo dentro da estável camada limite noturna.

Na Figura 9 é mostrado também que a referida chuva afetou a concentração do ozônio (O_3). Durante o período experimental do projeto LBA/EUSTACH a concentração de O_3 também foi medida, cujos detalhes de amostragem são descritos por Kirkman et al. (2002), os dados obtidos por Gatti et al. (2000), enquanto a variação da concentração média de O_3 são apresentados por Andreae et al. (2002). Em contraste ao CO_2 , o O_3 é geralmente esgotado na camada limite noturna. De meia-noite até o nascer do sol, normalmente as concentrações de O_3 são menores de 3ppb (Figura 9) devido à deposição superficial e reações químicas do O_3 com o óxido nítrico emitido pelo solo (Kirkman et al., 2002). No dia 14 de maio das 01:30 às 03:30 horas a concentração de O_3 é menor do que 1 ppb. Depois das 03:30 horas a concentração de O_3 aumenta lentamente, excedendo 5 ppb ao final da precipitação (05:30 horas), e repentinamente cresce para mais de 15 ppb durante a máxima intensidade do temporal (05:30 – 06:30 horas).

Os níveis de concentração de O_3 são normalmente maiores do que 15 ppb, valores estes iguais ao último período vespertino, quando a camada limite atmosférica é inteiramente misturada verticalmente por convecção. Durante a noite seguinte estas altas concentrações são conservadas na denominada camada residual. Esta camada está localizada entre o limite superior da estável camada limite noturna e a inversão térmica, que marca o fim superior da camada limite atmosférica (Oke, 1987; Stull, 1988). Conseqüentemente, o incomum elevado nível da concentração do O_3 (e os baixos níveis de CO_2), que foram observados durante o período entre 05:30 – 07:30 horas, foram originados da camada limite residual e trazidos à superfície por uma forte subsidência provocada pelo temporal.

O rápido transporte de massas de ar próximo ao nível de 800 hPa (aproximadamente 2000 metros) para a superfície foi demonstrado por Betts et al. (2002) para o mesmo sítio experimental. Para isso, eles usaram medidas simultâneas da concentração de O_3 e a equivalente temperatura potencial (θ_e). Nos processos convectivos úmidos a θ_e pode ser usada como um traçador do



(a) (b)

Figura 5 – Distribuição percentual da direção do vento (°) durante os períodos diurno (a) e noturno (b) de levantamento dos dados (15/04 – 21/05/99).

Figure 5 – Percentile distribution of the direction of the wind (°) during daylight (a) and nocturnal (b) conditions during the period of the experiment (15/04 – 21/05/99).

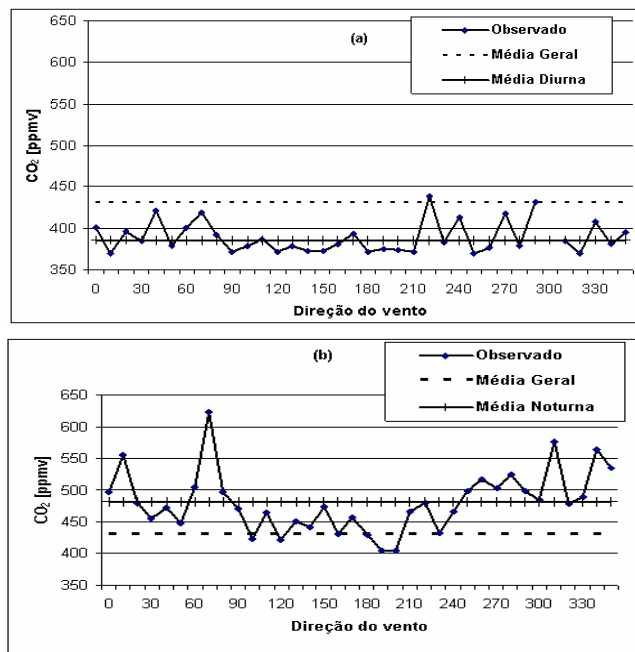


Figura 6 – Comparações entre a média geral experimental, média do período (média diurna ou média noturna) e as médias observadas de concentrações de CO₂ (ppmv) em função da direção do vento (°), no período diurno (a) e noturno (b). Período de levantamento de dados (15/04 – 21/05/99, diurno e noturno).

Figure 6 – Comparison between the sectorial averages of CO₂ concentration (ppmv) for the entire campaign and (a) sectorial averages for daylight CO₂ concentration measurements, and (b) sectorial averages for nighttime CO₂ concentration measurements. Data-collection period (15/04 – 21/05/99, daylight and nocturnal).

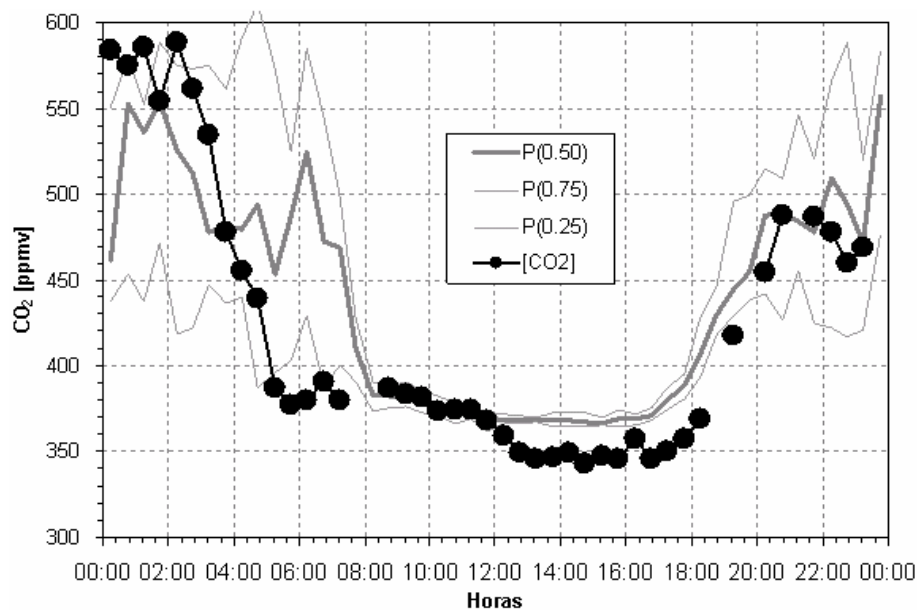


Figura 7 – Ciclo diário médio da concentração do dióxido de carbono (CO_2) com os respectivos percentis de 0.25, 0.50 e 0.75, no dia 14.05.1999.

Figure 7 – Daily cycles of the (CO_2) concentrations, with respective percentils of 0.25, 0.50 and 0.75, on 14.05.1999.

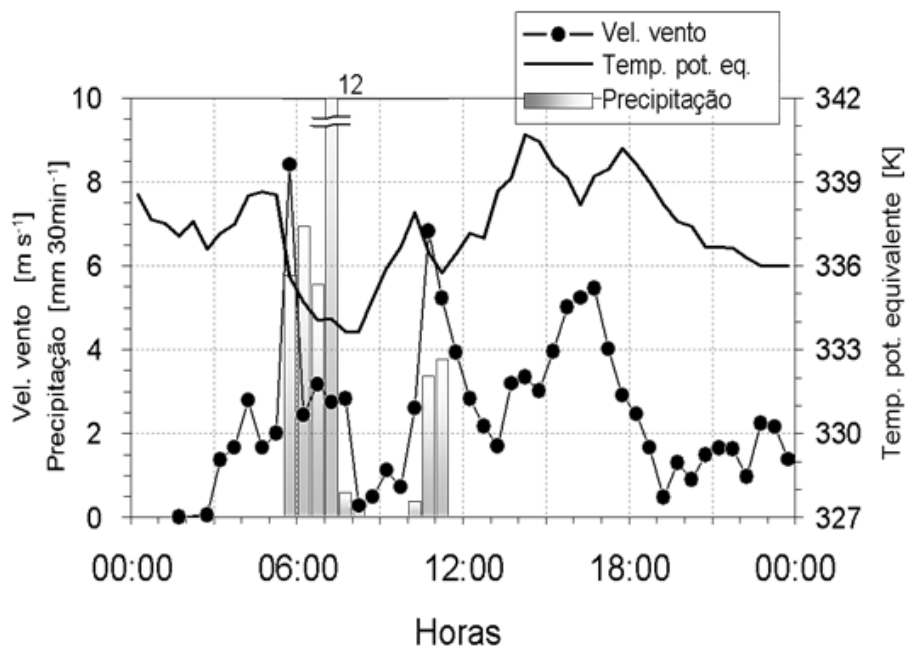


Figura 8 – Evolução temporal da distribuição da precipitação (mm), ciclo diário médio (30 min) da velocidade do vento ($m s^{-1}$) e temperatura potencial equivalente (K) no dia 14.05.1999.

Figure 8 – Percentile distribution of the precipitation (mm), 30 min average cycle of the wind speed ($m s^{-1}$) and equivalent potential temperature (K) on 14.05.1999.

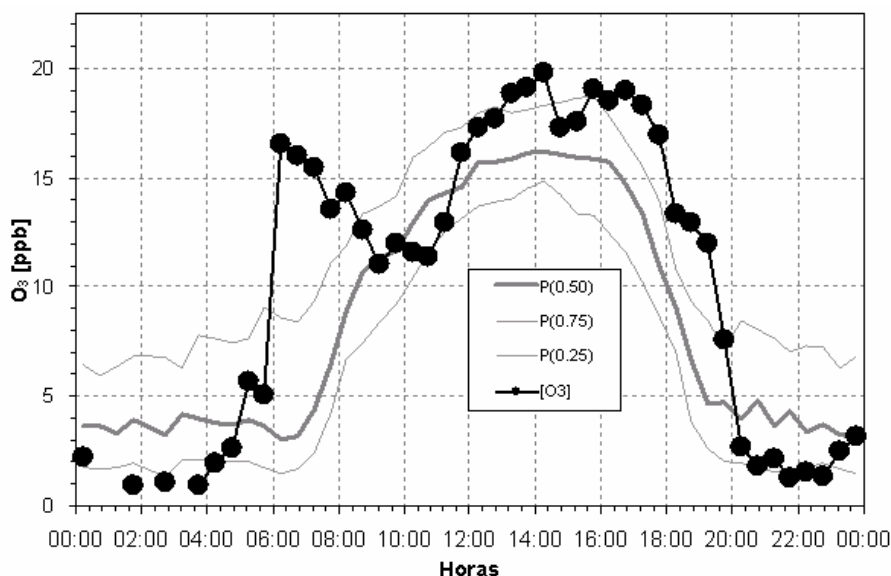


Figura 9 – Ciclo diário médio da concentração do ozônio (O₃) com os respectivos percentis de 0.25, 0.50 e 0.75, no dia 14.05.1999.

Figure 9 – Daily cycles of the O₃ concentrations, with respective percentils of 0.25, 0.50 and 0.75, during 14.05.1999.

transporte vertical, desde que sejam conservadas a condensação e evaporação da água (Emanuel, 1994). Nos trópicos, θ_e é geralmente decrescente com a altura, pois a sua fonte é a superfície terrestre (fluxos de calor sensível e latente), enquanto a troposfera é o sumidouro (resfriamento radiativo). Além disso, a estratificação térmica da atmosfera tropical é umidamente neutra, isto é, transportes ascendentes e descendentes por processos convectivos úmidos seguem a adiabática úmida ($\theta_e = \text{constante}$). θ_e é considerado conservativo quando as gotas da chuva (vindas da baixa-média troposfera; θ_e baixa) entra em contato com o ar não saturado da camada limite e resfria-o por evaporação. Finalmente, o ar resfriado descenderá, trazendo o ar com baixo θ_e para a superfície.

Para o dia em questão (14.05.1999) a variação temporal de θ_e (computado das medidas superficiais de pressão, temperatura e umidade do ar) é mostrada na Figura 8. Durante todo o efeito do temporal (05:30 – 08:00 horas) foi observada uma diminuição de 5 K de θ_e simultaneamente com a diminuição da concentração de CO₂ (50 ppmv) e ao aumento repentino da concentração de O₃ (10 ppb). Betts et al. (2002) observaram também variações rápidas na concentração de O₃ e θ_e (de sinal oposto) durante o evento noturno do temporal, demonstrando uma efetiva ligação entre alta concentração de O₃ e de baixo θ_e durante o temporal. Com a ajuda de radiossondagens eles foram capazes de identificar a origem de correspondentes massas de ar a 800 hPa.

CONCLUSÃO

A concentração de CO₂ apresentou uma média diária de 431 ppmv durante o período diurno a média foi de 386 ppmv e de 482 ppmv no período noturno. Quando confrontado com a velocidade do vento, a concentração de CO₂ mostrou ter relação inversa, pois para valores de velocidade do vento abaixo de 1,5 m s⁻¹ esteve associado a maiores concentrações de CO₂, enquanto para velocidades variando entre 1,5 – 7,0 m s⁻¹ são as menores concentrações. Já a umidade relativa do ar apresentou um ciclo semelhante ao da concentração de CO₂, onde os ciclos diários são bem parecidos com relação aos máximos e mínimos valores, os mínimos valores se deve a presença de RFA e os máximos valores ocorreu por consequência da ausência de RFA associado a um aumento da estabilidade atmosférica e a diminuição da dispersão do CO₂.

AGRADECIMENTOS

Os autores querem deixar aqui registrado agradecimento especial ao Dr. Antonio Manzi, do INPA, pela liberação de alguns dados meteorológicos da torre na fazenda Nossa Senhora Aparecida, Rondônia. Agradecimentos também são estendidos a toda equipe de pesquisadores da USP, IPEN, UFBA, UFAL, MPIC, ALTERRA e outras instituições que participaram dos trabalhos de campo e, principalmente, ao Dr. Joern von Jouanne, do MPI, pela valiosa contribuição na análise e correção do texto. O primeiro autor agra-

dece à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio Financeiro/Bolsa de Mestrado concedida.

REFERÊNCIAS

- ANDREAE MO, ARTAXO P, BRANDAO C, CARSWELL FE, CICCIOIOLI P, DA CASTA AL, CULF AD, ESTEVES JL, GASH JHC, GRACE J, KABAT P, LELIEVELD J, MALHI Y, MANZI AO, MEIXNER FX, NOBRE AD, NOBRE C, RUIVO MDLP, SILVA-DIAS MA, STEFANI P, VALENTINI R, VON JOUANNE J & WATERLOO MJ. 2002. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. *J. Geophys. Res.*, 107(D20): 8066, doi:10.1029/2001JD000524.
- BETTS AK, GATTI LV, CORDOVA AM, SILVA DIAS MAF & FUENTES JD. 2002. Transport of ozone to the surface by convective downdrafts at night. *J. Geophys. Res.*, 107(D20): 8046, doi:10.1029/2000JD000158.
- CONWAY TJ, TANS PP, WATERMAN LS, THONING KK, KITZIS DR, MASARIE KA & ZHANG N. 1994. Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network. *J. Geophysical Res.*, 99(D11): 22831–22855.
- COSTA RF. 2000. Fluxos de dióxido de carbono em uma área de floresta na Amazônia Central. Dissertação (Mestrado em agrometeorologia), Piracicaba/SP: ESALQ/USP, p. 97.
- EDWARDS NT & SOLLINS P. 1973. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components. *Ecology*, 54: 406–412.
- EMANUEL KA. 1994. *Atmospheric Convection*. Oxford Univ. Press, New York, 580 p.
- EPRON D & DREYER E. 1993. Photosynthesis of oak leaves and water stress maintenance of high photochemical efficiency of photosystem II and occurrence of non-uniform CO₂ assimilation. *Tree physiology*, 13: 107–117.
- FISCH G. 1996. Camada Limite Amazônica: Aspectos Observacionais e de Modelagem. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE/NTD, São José dos Campos, SP, p. 171.
- FISCH G, CULF AD & NOBRE CA. 1996. Modelling convective boundary layer growth in Rondonia. In: GASH JHC, NOBRE CA, ROBERTS JM & VICTORIA RL. (eds), *Amazonian Deforestation and Climate*, 1 ed., Chichester, John Wiley & Sons, p. 425–436.
- GATTI LV, CORDOVA LEAL AM, YAMAZAKI A, VASCONCELOS MS, ARTAXO P, SILVA DIAS MAF, MEIXNER FX & GUENTHER A. 2000. Dry and wet season measurements of trace gases in the Abracos pasture site, Rondônia. *Anais First LBA Science Conference, Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*, Belem, Brazil, 26–28 June.
- GRACE J, LLOYD J, McINTYRE J, MIRANDA AC, MEIR P & MIRANDA HS. 1996. Carbon dioxide flux over Amazon, rainforest in Rondônia. In: GASH JHC, NOBRE CA, ROBERTS JM & VICTORIA RL. (Eds), *Amazonian Deforestation and Climate*, 1 ed., Chichester, John Wiley & Sons, p. 307–318.
- HENSEN A, VERMEULEN AT, WYERS GP & ZHANG Y. 1996. Eddy correlation and relaxed eddy accumulation measurements of CO₂ fluxes over grassland. *Phys. Chem. Earth*, 21: 383–388.
- HERRIOTT DR & SCHULTE HJ. 1965. Folded optical delay lines. *Appl. Opt.*, 4: 883–889.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 1996. Technical Summary. In: HOUGHTON JT, MEIRA FILHO LG, CALLANDER BA, HARRIS N, KATTENBERG A & MASKELL K. (Eds). *Climate change 1995: The science of climate change*. IPCC 1996. Cambridge: Cambridge University press, p. 9–49.
- KEELING CD & WHORF TP. 1999. Atmospheric CO₂ concentration (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa observatory. Hawaii, acessado em 2002, <http://www.cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp001.html>.
- KIRKMAN GA, GUT A, AMMANN C, GATTI LV, CORDOVA AM, MOURA MAL, ANDREAE MO & MEIXNER FX. 2002. Surface exchange of nitrogen dioxide, nitric oxide and ozone at a cattle pasture in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res.*, 107 (D20), 8083, doi:10.1029/2001JD000523.
- KORMANN R. 1997. Entwicklung eines frequenzmodulierten Diodenlaserspektrometers zur Bestimmung von Spurengasflüssen in der Atmosphäre, Thesis de Doutorado do Institut Atmosphärische Umweltforschung da Universidade de Munique, Band 49 – 90, Garmisch-Partenkirchen (Alemanha).
- KRUPA SV. 1997. Global Climate Change: processes and products – an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 46: 73–88.
- KUBISKE ME & ABRAMS MD. 1994. Ecophysiological analyses of woody species in contrasting temperate communities during wet and dry years. *Oecologia*, 8: 303–312.
- LEITE CC. 2004. Características da Camada Limite Convectiva Durante A Transição da Estação Seca Para Chuvosa na Amazônia – Comparação Floresta/Pastagem (DRY TO WET AMC/LBA - 2002). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, p. 61.
- MEIR P, GRACE J, MIRANDA AC & LLOYD J. 1996. Soil respiration in a rainforest in Amazonia, and in Cerrado in Central Brazil. In: GASH JHC, NOBRE CA, ROBERTS JM & VICTORIA RL. (Eds), *Amazonian Deforestation and Climate*, 1 ed., Chichester, John Wiley & Sons, p. 319–330.
- MOURA MAL, MEIXNER FX, TREBS I, LYRA RFF, ANDREAE MO & NASCIMENTO FILHO MF. 2004. Evidencia observacional das brisas do lago de Balbina (Amazonas) e seus efeitos sobre a concentração do ozônio. *Acta Amazônica*, 34(4): 605–611.

- OKE TR. 1987. *Boundary layer climates*. Routledge, London and New York, 435 p.
- OLIVEIRA PJ & FISCH G. 2000. Efeito da Turbulência na Camada Limite Atmosférica em áreas de Floresta e Pastagem na Amazônia. *Rev. Bras. de Meteorol.*, 15(2): 39–44.
- PEARCY RW, EHLERINGER J, MOONEY HA & RUNDEL PW. 1989. *Plant Physiological Ecology, field methods and Instrumentation*. London: Chapman and Hall, 457 p.
- RAICH JW & SCHLESINGER WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44: 81–99.
- RIOS CC. A floresta. Acessado em 2002. <http://www.bhmet.com.br/~cvrios/floresta.html>.
- SANTOS EO. 1999. Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da floresta amazônica. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, p. 87.
- SILVA CMSE. 2005. Comportamento da Camada Limite Atmosférica sobre pastagem em Rondônia durante a transição da estação seca para chuvosa em 2002. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, p. 82.
- SILVA JÚNIOR RSS. 2003. Concentrações e fluxos de dióxido de carbono (CO₂) sobre pastagens na região amazônica. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, p. 78.
- SOTTA ED. 1998. Fluxo de CO₂ entre o solo e a atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia central. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus/AM, p. 150.
- STULL RB. 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 666 p.
- TANS PP, BAKWIN PS & GUENTHER DW. 1996. A feasible global carbon cycle observing system: a plan to decipher today's carbon cycle based on observations. *Global change biology*, 2: 309–318.
- TARDIEU F & DAVIES WJ. 1992. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. *Plant physiology*, 98: 540–545.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Rosiberto Salustiano da Silva Júnior. Formação em Meteorologia nos níveis de graduação (1997-2001) e mestrado (2001-2003) na Universidade Federal de Alagoas – UFAL, atualmente cursa doutorado em meteorologia na Universidade de São Paulo (2005), bem como foi professor substituto da UFAL no período 2003-2005 do Departamento de Solos, Engenharia e Economia Rural. Tem vários trabalhos publicados na área de climatologia, micrometeorologia e química da atmosfera. Áreas de concentração de estudo, poluição atmosférica, micrometeorologia e climatologia, com publicações nas respectivas áreas.

Marcos Antônio Lima Moura. Formado em Meteorologia (1984) pela Universidade Federal Alagoas, depois fez estudos de aprofundamentos na Universidade de Hannover (1986-1989) na área de micrometeorologia, sendo que em seguida cursou mestrado (1992) e doutorado (2000) em Energia na Agricultura na UNESP. Participou de diversos experimentos na Amazônia. Tem vários trabalhos publicados na área de radiação solar, micrometeorologia e química da atmosfera, como também diversas orientações de mestrado nas respectivas áreas.

Franz X. Meixner. Nascido em Wuerzburg (1951), Alemanha, formado em Meteorologia (1976), com Doutorado em Geociências (1981) pela Universidade de Frankfurt/Main. Atualmente é pesquisador sênior na área de Micrometeorologia e Metodologia de Fluxos do Departamento de Bioquímica, Instituto Max Planck de Química/Mainz/Alemanha, como também é Professor Associado do Departamento de Física da Universidade de Zimbábue (Harare). Foi coordenador/participante de vários projetos, entre os quais STRATOS III, BIATEX-1, EUSTACH-LBA, CLAIRE-LBA, etc. Já orientou várias teses de doutorado com ênfase em micrometeorologia e emissão de gases traços e tem várias publicações.

Robert Kormann. Formado em Física pela Universidade de Munique (1992) e Doutorado em Física do Meio Ambiente (1997) no Instituto de Pesquisa Atmosférica para o Meio Ambiente, Garmisch-Partenkirchen/Alemanha. Pesquisador do Departamento de Bioquímica, Instituto Max Planck de Química/Mainz/Alemanha, onde trabalha no desenvolvimento de um compacto espectrografo para medição de gases traços. Participou de vários experimentos (LBA-Claire, Riceotopes, Eustach-LBA, Minatroc, Minos und Utopihan-Act) e conta com várias publicações na área.

Roberto Fernando da Fonseca Lyra. Formado em meteorologia pela UFAL em 1985. Doutor em Micrometeorologia pela Université Paul Sabatier (Toulouse/FR) em 1990. Desde o ingresso na pós-graduação vem se dedicando a pesquisas ligadas a relação floresta/atmosfera. Participou de diversos experimentos de amplitude internacional, no Brasil, na Europa e na África. Desde 1992 tem mantido estreita relação com os grupos que realizam pesquisa na Amazônia tendo como foco as repercussões do desmatamento na termodinâmica da camada limite atmosférica. Orientou 2 teses de doutorado, 6 de mestrado, diversos trabalhos de conclusão de curso e iniciação científica.

Manoel Ferreira do Nascimento Filho. Nascido em Maceió-AL (1955), Brasil, formado em Meteorologia (1984), com Doutorado em Físico-Química do Meio Ambiente (1990) pela Universidade de Paul Sabatier/Toulouse/França. Atualmente professor e pesquisador na área de Meteorologia Ambiental do Departamento de Meteorologia da UFAL/Alagoas/Brasil, como também coordena um Laboratório de Monitoramento da Qualidade do Ar. Já desenvolveu vários projetos e orientou várias teses de mestrado com ênfase em poluição atmosférica, chuvas ácidas e emissões de gases de efeito estufa. Tendo algumas publicações na área.