Revista Brasileira de Meteorologia, **v.18**, **n.1**, 61-70, 2003

# FLUXOS TURBULENTOS DE CALOR SENSÍVEL, VAPOR DE ÁGUA E $CO_2$ SOBRE PLANTAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* sp.) EM SERTÃOZINHO-SP

OSVALDO M. R. CABRAL[1], HUMBERTO R. DA ROCHA[2], MARCOS ANTÔNIO V. LIGO[1], ORIVALDO BRUNINI[3], MARIA ASSUNÇÃO F. S. DIAS[2]

[1] Embrapa-Meio Ambiente - Caixa Postal 69 - CEP 13820-000 - Jaguariúna SP - ocabral@cnpma.embrapa.br

[2] Universidade de São Paulo ,

[3] Instituto Agronômico de Campinas

**RESUMO**

Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor de água e $CO_2$ foram observados sobre plantação de cana-de-açúcar ao longo de 405 dias do ciclo, que teve início em abril de 1998 e final em maio de 1999, em Sertãozinho (21°07´S, 48°11´W). O fluxo total de calor latente foi de 939mm e representou 70% da precipitação (1351mm) registrada. A evapotranspiração média foi de 2,3mmdia$^{-1}$, variando entre 0,5 mmdia$^{-1}$ no inverno, e 7,0 mmdia$^{-1}$ no verão, após a ocorrência de precipitações, quando além da transpiração observou-se a evaporação da chuva interceptada pelo dossel e solo. Valores máximos de assimilação de $CO_2$ de 50µmol$CO_2$m$^{-2}$s$^{-1}$, ocorreram no verão, quando a plantação encontrava-se plenamente desenvolvida. A condutância do dossel ao transporte de vapor de água e $CO_2$ foi em média 0,3 molm$^{-2}$s$^{-1}$, tendo sido adequadamente representada pelo modelo de plantas $C_4$. O balanço de $CO_2$ integrado ao longo do ciclo foi de 6,2 kg$CO_2$m$^{-2}$, e embora tenha sido 15% inferior à biomassa aérea, cuja fixação foi de (7,8±1,6)kg$CO_2$m$^{-2}$, foi da mesma ordem devido ao coeficiente de variação observado (20%).

**Palavras-chave:** covariância de vórtices, cana-de-açúcar, evapotranspiração, $CO_2$, condutância

**ABSTRACT:** TURBULENT FLUXES OF SENSIBLE HEAT, WATER VAPOUR AND $CO_2$ ABOVE SUGARCANE (*Saccharum* sp.) PLANTATION IN SERTÃOZINHO-SP.

Turbulent fluxes (eddy covariance) of sensible heat, water vapour and $CO_2$ have been measured above a sugarcane plantation during the 405 days cycle, between April 1998 and May 1999, in Sertãozinho (21°07´S, 48°11´W). The total latent heat flux was 939mm, and represented 70% of the precipitation(1351mm). The average evapotranspiration was 2.3mmday$^{-1}$, whose range was 0.5 mmday$^{-1}$ during the winter, and 7.0 mmday$^{-1}$ in the summer, and ocurred after rainfall episodes, when plant transpiration and evaporation of soil water were measured. The maximum $CO_2$ fluxes of 50µmol$CO_2$m$^{-2}$s$^{-1}$ observed in the summer, followed a nearly constant diurnal surface conductance (0.3molm$^{-2}$s$^{-1}$), which was adequated estimated by $C_4$ plant models. The integrated $CO_2$ flux balance was 6.2 kg$CO_2$m$^{-2}$, and although 15% lower than the aereal biomass which was (7,8±1,6)kg$CO_2$m$^{-2}$, exhibited the same order, based on the biomass coefficient of variation (20%).

**Key words:** eddy covariance, sugarcane, evapotranspiration, $CO_2$ fluxes, surface conductance.

## 1 -INTRODUÇÃO

As interações entre o solo, a vegetação e a atmosfera dependem das características das superfícies tais como o coeficiente de reflexão ou albedo (Sellers et al., 1989); as propriedades aerodinâmicas (rugosidade), que ao serem modificadas alteram a convergência horizontal de umidade e a distribuição espacial da precipitação; e a disponibilidade hídrica dos solos e controle fisiológico das plantas, que regulam as taxas de transferência de calor sensível e latente (Boaugeault, 1991, Betts et al., 1996).

A caracterização do balanço de energia da superfície é necessária na determinação da sua temperatura; do fluxo de vapor de água e o aquecimento da atmosfera. Nas escalas de tempo menores estes processos são responsáveis pela estabilidade atmosférica, altura da camada limite e precipitação convectiva. Nas escalas de tempo maiores o balanço local de água pode atuar significativamente, determinando a capacidade da superfície em fixar carbono (Baldocchi et al., 2001).

Devido à importância da cana-de-açúcar no Brasil, que é o maior produtor mundial seguido pela Índia e Austrália, e cuja área plantada é da ordem de 4,5 milhões de hectares, dos quais 52% no Estado de São Paulo, o que representa aproximadamente 14% da sua área agrícola, foi adotado um programa observacional contínuo, e de longo prazo, abrangendo diferentes anos, para monitorar as densidades de fluxo de $CO_2$, vapor de água e energia, entre a vegetação e a atmosfera, visando a compreensão das interações nas escalas de tempo sazonal e anual (Meyers, 2001).

## 2-MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados foram obtidos no sítio experimental instalado na Usina Santa Elisa, localizada no município de Sertãozinho (21°07´S, 48°11´W), no Estado de São Paulo, em solo classificado como Latossolo Vermelho Escuro. No centro de uma área contínua de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) de aproximadamente 2.000 ha, um talhão de 36,2 ha foi escolhido, contendo a rebrota (soca) de cana-de-açúcar variedade SP71-6180, plantada num espaçamento de 1,4m entre linhas. A duração do ciclo 1998/1999 do cultivo foi de 405 dias, com o início em 14 de abril de 1998, que corresponde ao dia do ano 104, e a colheita com queima foi realizada em 23 de maio de 1999 (dia 143). À partir de 100 dias após a colheita (dia 204 de 1998) foram realizadas amostragens mensais da biomassa aérea, obtendo-se: o teor de carbono; o índice de área foliar (IAF) relativo às folhas verdes e secas presentes; a altura dos colmos, e as dimensões características da folha mais nova totalmente desenvolvida.

Os fluxos turbulentos de momento ($u_*$) , vapor de água (LE), calor sensível (H) e $CO_2$ foram medidos acima do dossel (10m), através de um sistema de covariância de vórtices similar ao descrito em Moncrieff et al.(1997a); composto de um analisador de gás infravermelho (IRGA-LICor 6262) e de um anemômetro ultra-sônico tridimensional (Gill-1012R2A). O IRGA operou no modo absoluto e fluxo de 8 $lmin^{-1}$, com nitrogênio na célula de referência; as calibrações foram realizadas quinzenalmente através de $CO_2$ padrão (340ppm) e gerador de ponto de orvalho (LICor-610), observando-se excelente estabilidade ao longo do tempo.

No mesmo nível de 10m acima do solo da plantação, foram instalados sensores de radiação solar global incidente e refletida (LICor); saldo de radiação ($R_n$) e fluxo de calor (G) no solo (REBS); temperatura e umidade do ar (VAISALA); direção e velocidade do vento (RM Young), e precipitação (Texas), conectados à um sistema de aquisição de dados (Campbell-CR10X), que os interrogava à cada 10 segundos e armazenava as médias à cada 10 minutos.

Os fluxos turbulentos foram obtidos à cada 30 minutos, através das flutuações medidas à 10Hz, da velocidade vertical do vento, temperatura, umidade e $CO_2$ do ar em relação às médias móveis calculadas recursivamente, cuja constante de tempo foi de 15 minutos. Foram aplicadas às covariâncias as rotações de eixos (Kaimal & Finnigan, 1994) e correções espectrais para a atenuação do escoamento em dutos (Moncrieff *et al*, 1997a). Durante os períodos diurnos em que a soma de H e LE foi inferior à 30% da energia disponível (Rn-G) o fechamento do balanço de energia foi obtido através dos valores observados da razão de Bowen ($\beta$=H/LE), conforme Twine et al. (2000), e a mesma correção foi aplicada aos balanços diurnos de $CO_2$.

As observações dos fluxos de $CO_2$ sob condições estáveis (à noite) representa uma séria restrição ao método de correlação de vórtices (Grace et al., 1998; Goulden et al., 1996; Law et al., 1999). Nestes casos, as estimativas do balanço de $CO_2$ foram obtidas através do efluxo de $CO_2$ do solo que depende exponencialmente da temperatura do solo (Rocha et al., 2000), pois o fluxo médio noturno ($4\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$), sob condições de maior turbulência, ou velocidade horizontal do vento acima de $2ms^{-1}$, foi aproximadamente o dobro do efluxo do solo.

A condutância aerodinâmica ($\mathbf{g_a}$) ao transporte de calor e vapor de água entre o dossel e a altura de referência (10m) foi calculada como:

$$\mathbf{g_a} = \{u/u_*^2 + [\ln(z_{0M}/z_{0H}) + M_M - M_H]\}^{-1} \qquad (1)$$

onde u e $u_*$ são a velocidade do vento e de fricção, medidas pelo anemômetro sônico; k é a constante de von Kármam (0,41); $M_M$ e $M_H$ são as correções devido à instabilidade atmosférica para o transporte de momento e calor sensível, e o valor da razão entre os comprimentos de rugosidade ($z_{0M}/z_{0H}$), que representa a correção devido à diferença entre a altura das fontes/sumidouros na vegetação, foi dado o valor 10 (Miranda et al., 1997).

A condutância da camada limite da folha mais nova totalmente desenvolvida ($\mathbf{g_b}$), que é necessária no cálculo da temperatura e umidade na superfície foliar foi obtida através da seguinte equação:

$$\mathbf{g_b} = 0{,}0071 * (u_{hc}/L_f)^{0.5} \qquad (2)$$

onde, $u_{hc}$ é a velocidade do vento na altura do dossel; $L_f$ é a largura da folha mais nova totalmente desenvolvida, e o coeficiente 0,0071 é utilizado no transporte de vapor de água (Boegh et al., 1999).

Os fluxos medidos de vapor de água foram utilizados para calcular a condutância da cobertura vegetal, através da inversão da equação de Penman-Monteith:

$$\mathbf{g_c} = \{[\Delta(R_n\text{-}G\text{-}LE)/\mathbf{g_a} + \rho_a c_p D]/\gamma LE - 1/\mathbf{g_a}\}^{-1} \qquad (3)$$

onde, $\Delta_a$ $c_p$ são a densidade e o calor específico do ar, respectivamente; (é a constante psicrométrica) é derivada da curva da pressão de vapor de saturação em relação à temperatura, e D é a diferença entre a pressão de vapor na temperatura da superfície da folha, e do ar do dossel (Cain, 1998; Grace *et al*, 1998; Thorgeirsson e Soegaard, 1999).

Nas equações acima, as unidades da condutância ($ms^{-1}$) foram transformadas para ($molm^{-2}s^{-1}$) através da equação dos gases (P/RT), onde P é a pressão atmosférica, T é temperatura e R é a constante dos gases (8,34).

## 3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1- Ciclos diários dos fluxos de radiação e albedo da superfície

O ciclo diário dos componentes de radiação (médias de 30min) e o albedo da superfície são apresentados na Figuras 1(a,b), em dois períodos do ano de 1998. A sazonalidade (Figura 1a) foi observada através da redução nos fluxos máximos de radiação solar incidente (Si) e saldo de radiação (Rn), comparando-se os dias de março e maio. Em contraposição à forçante climática, verificou-se o efeito da alteração da superfície com relação aos fluxos de calor no solo (G) e albedo (Figura 1b). Em março de 1998 a plantação encontrava-se plenamente desenvolvida e os fluxos máximos de calor no solo (G) foram de 60 $Wm^{-2}$, ou cerca de 7% do saldo de radiação (Rn), e valores mínimos de albedo de 0,22. Os três dias em maio representaram o período com o solo descoberto, após a colheita, quando foram observados fluxos máximos de calor no solo (Figura 1a) de 140$Wm^{-2}$, o equivalente a 30% de Rn, e valores mínimos de albedo de 0,12.

Comparativamente, a variação observada no albedo devido a alteração da superfície correspondeu à diferença encontrada por Bastable et al. (1993), entre a floresta tropical (0,13) e pastagem (0,21); os valores de G foram 1% e 5% de Rn, respectivamente.

### 3.2- Características aerodinâmicas do cultivo de cana-de-açúcar

Do ponto de vista aerodinâmico, o ciclo da cultura de cana-de-açúcar apresenta uma fase inicial, dominada pelo solo descoberto e linhas contendo resíduos da colheita; em seguida um período intermediário, durante o qual o solo encontra-se parcialmente coberto, e finalmente a cobertura total do solo, o que ocorre em monocultivos após ter sido atingido um índice de área foliar (IAF) em torno de 4 (Shuttleworth e Gurney, 1990).

A representatividade das medidas obtidas acima da vegetação (Schuepp et al., 1990; Gash, 1986) pode ser estimada através do cálculo da área de abrangência dos fluxos (**footprint**). Sob condições instáveis 50% dos fluxos medidos eram provenientes de um círculo cujo raio era 500m, e durante condições estáveis raios acima de 1500m.

Na Figura 2 são apresentados os valores médios mensais do deslocamento do plano zero (**d**) e comprimento de rugosidade ($\mathbf{z_0}$) obtidos por Rocha (2001), através de dados disponíveis do perfil de vento, que indicam a semelhança entre as estimativas da altura dos colmos e **d**, ao longo do ciclo 1998/1999.

Ao final do ciclo observaram-se **d** menores, em decorrência do tombamento dos colmos verificado à partir de fevereiro de 1999, o que não foi detectado pela estimativa de altura, que é função da biomassa seca dos colmos.

Considerando-se o dossel totalmente desenvolvido, acima dos colmos normalmente encontram-se em média 4 folhas em expansão (Robertson et al., 1998), que podem

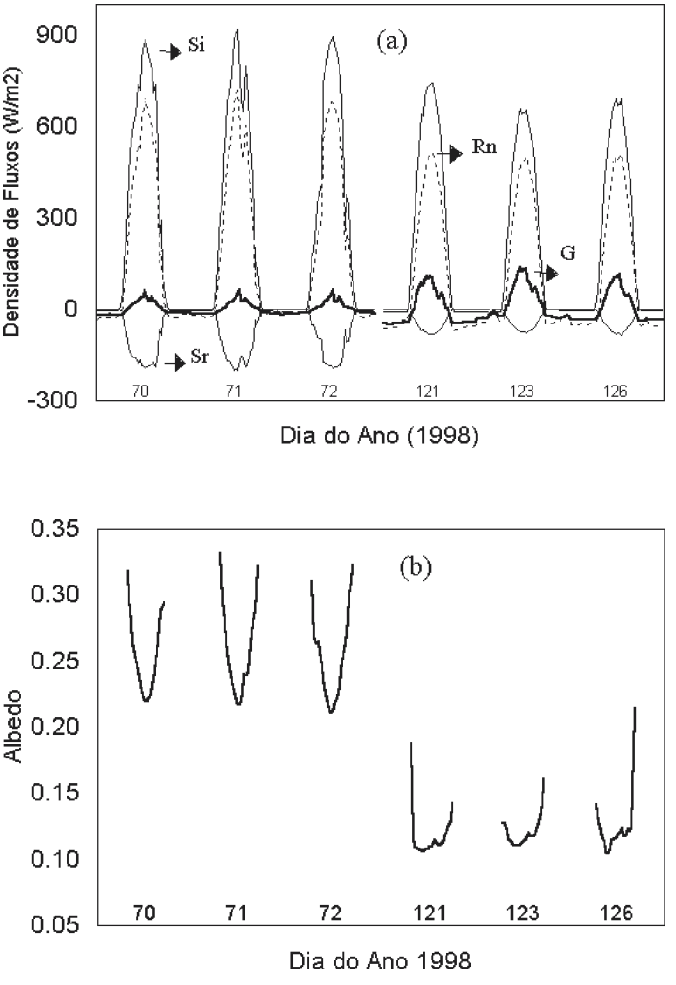



Figura 1 – Ciclos diários observados em março e maio de 1998, sobre cana-de-açúcar, de: (a) radiação solar incidente-Si, refletida-Sr, saldo de radiação-Rn e fluxo de calor no solo-G; (b) albedo da superfície

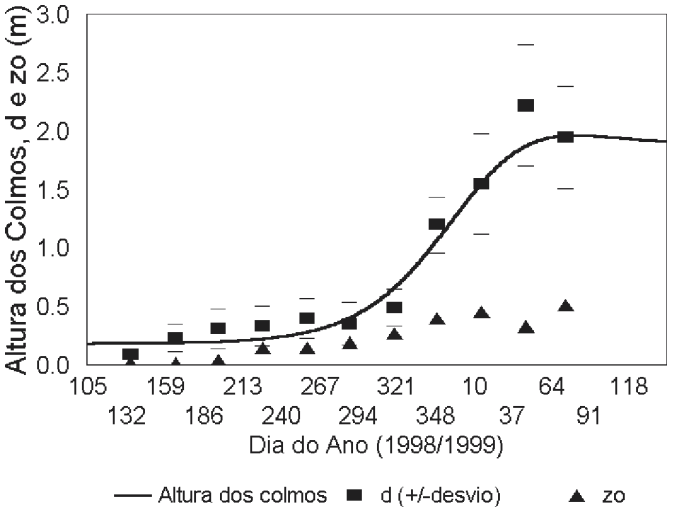



Figura 2 – Estimativas da Altura dos colmos (m); **d** (m), deslocamento do plano zero; $\mathbf{z}_0$ (m), comprimento de rugosidade, sobre a cultura de cana-de-açúcar ao longo do ciclo 1998-1999.

apresentar aproximadamente 1,5m de comprimento, mas devido ao fato de não permanecerem na posição vertical, dobrando-se parcialmente, a altura dossel ($h_c$) é obtida adicionando-se cerca de 1m à altura dos colmos, o que implica num $h_c$ máximo em torno de 3m. Os maiores valores obtidos de **d** e $\mathbf{z}_0$ foram 2,2m e 0,5m respectivamente, representando 73 e 17% de $h_c$. Em cultivos uniformes, segundo Monteith e Unsworth (1991), a razão $\mathbf{d}/h_c$ varia entre: 0,6 e 0,7; e $\mathbf{z}_0/h_c$ entre: 0,08 e 0,12.

Sob condições de cultivo esparso, ou cobertura parcial do solo, que foram observadas até aproximadamente novembro de 1998 (dia 329) na Figura 2, $\mathbf{z}_0$ foi aproximadamente metade de **d**, e apesar do crescimento do dossel, durante um longo período, as variações em ambos foram mínimas. Nesta situação, outros fatores atuantes como o espaçamento das linhas de plantio, variabilidade na direção do vento e percentual de cobertura, dificultam a definição de padrões médios (Sene, 1994).

Os valores médios diários da condutância aerodinâmica ao transporte de calor sensível e latente ($\mathbf{g}_a$) entre o dossel e a altura de referência (10m), e a condutância da camada limite da folha mais nova totalmente desenvolvida ($\mathbf{g}_b$) encontram-se na Figura 3.

Sob condições de dossel totalmente desenvolvido, antes do corte (**q**) e após o dia 347 na Figura 3, foram observados valores de $\mathbf{g}_a$ em torno de 1 mol $m^{-2}s^{-1}$; e 0,5 mol $m^{-2}s^{-1}$ após a colheita. Segundo Wright et al. (1992, 1995) os valores típicos de $\mathbf{g}_a$ sobre floresta tropical e pastagem são de 4 e 0,4 mol $m^{-2}s^{-1}$ , respectivamente.

A condutância $\mathbf{g}_b$ diminuiu progressivamente até o dia 293 (Figura 3), observando-se o mínimo de 1 mol $m^{-2}s^{-1}$. Como $\mathbf{g}_b$ é inversamente proporcional à largura da folha, que ao atingir o máximo desenvolvimento permanece constante, o aumento estimado após o dia 293 deveu-se às menores velocidades do vento registradas sobre o dossel (não apresentadas).

### 3.2– Fluxos de Calor Sensível e Calor Latente

Os fluxos medidos pelo sistema de covariância de vórtices de calor sensível (H) e latente (LE) sob condições instáveis ($R_n$>150 $Wm^{-2}$) foram utilizados no cálculo dos valores médios diurnos da razão de Bowen (β=H/LE), que são apresentados na Figura 4. Durante aproximadamente 100 dias após o corte (**q** na figura), no ciclo 1998/1999, β foi superior à 1 em decorrência das pequenas taxas de transpiração e evaporação da água na camada superficial do solo. Nos dias subseqüentes à ocorrência de precipitação observou-se a diminuição de β, em conseqüência da evaporação da água do solo.

Após este período, com o desenvolvimento da vegetação observou-se o incremento na transpiração, e os valores de β tornam-se inferiores à 0,5. Antes da colheita em 1998 (**q**), β era inferior a 0,5; ao final do ciclo em 1999 os valores de β já eram maiores do que 1, devido ao ciclo mais longo (405 dias) e o amadurecimento da plantação em relação ao ciclo anterior (1997/1998), que foi de 369 dias.

Os totais diurnos de calor sensível (H) e calor latente (LE) são apresentados nas Figuras 5(a,b). Os valores observados de H (Figura 5a) variaram entre 4 e 6 $MJm^{-2}$, no início do ciclo, quando o solo encontrava-se descoberto, e sob condições de cultivo plenamente desenvolvido, em consequência de alterações no albedo e fisiologia da cultura.

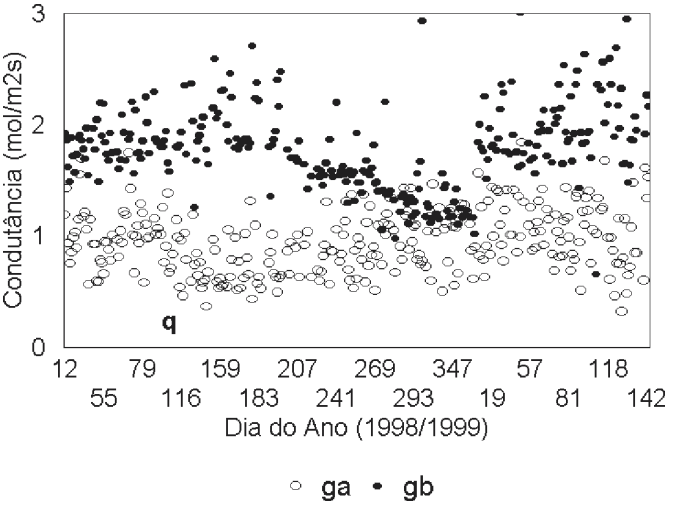



Figura 3 – Condutância aerodinâmica ao transporte de calor sensível/latente entre o dossel e a atmosfera ($g_a$), e condutância da camada limite da folha mais nova desenvolvida ($g_b$), sobre plantação de cana-de-açúcar entre 1998-1999.

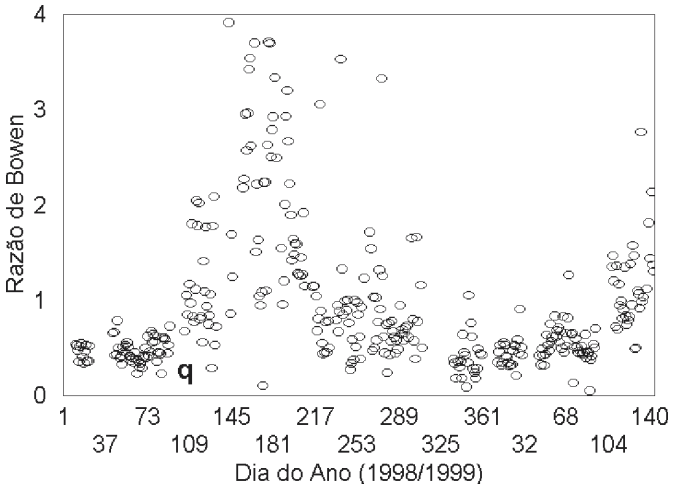


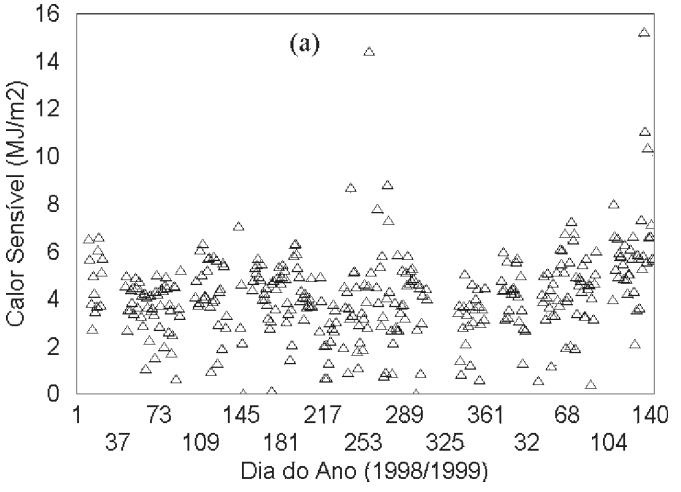

Figura 4 – Valores médios diurnos da Razão de Bowen (β) observados sobre a cultura de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999.

Os menores totais diários de LE (Figura 5b) foram registrados durante a estação seca (1MJm$^{-2}$), e valores elevados da ordem de 16 MJm$^{-2}$, o equivalente à 6,7mmdia$^{-1}$ , ocorreram durante o verão, correspondendo à transpiração e evaporação da chuva interceptada pelo dossel e solo. As tendências observadas ao final do ciclo em H e LE estão de acordo com o amadurecimento da vegetação (Alfonsi et al., 1987; Machado, 1987; Mutton et al., 1996), quando se observa a redução na transpiração e aumento em H (Moncrieff et al., 1997b), o que não representa a totalidade das plantações de cana-de-açúcar, tendo em vista a existência de variedades tardias que mantêm a atividade fisiológica em pleno inverno.

O sistema de covariância de vórtices operou durante 295 dias, e o fluxo acumulado de LE, ou evapotranspiração real, foi de 686mm; o valor médio foi de 2,3mmdia$^{-1}$ e os extremos variaram entre 0,5 e 7 mmdia$^{-1}$. Durante o mesmo período a evapotranspiração potencial segundo Penman (Cain, 1998) foi estimada em 1269mm, ou 85% maior do que a evapotranspiração real; utilizando-se os coeficientes de cultura para a cana-de-açúcar (Scardua e Rosenfeld, 1987), o total estimado foi de 1015mm, 48% acima do observado e 20% inferior à estimativa pela equação de Penman. Tais discrepâncias decorrem da não inclusão da condutância da superfície, cuja adequada representação é fundamental para a obtenção de estimativas mais realistas do transporte de vapor de água pela vegetação.

Os fluxos de LE durante os períodos sem medidas (110 dias) foram estimados através da prévia variação diurna média (Falge et al., 2001), obtendo-se o total de 939mm de evapotranspiração real para o ciclo da cultura, que representou 70% da precipitação total (1351mm). O valor estimado é comparável à estimativa de 1062mm de O'May e Izuno (1995), obtida na Flórida, abrangendo variações de 0,7 à 4,5mmdia$^{-1}$.

Os ciclos diurnos médios dos fluxos de calor sensível e calor latente são apresentados nas Figuras 6(a,b), que contêm as médias dos fluxos medidos à cada 30 minutos. São dois meses contrastantes: outubro de 1998, ao final da estação seca, e índice de área foliar (IAF) igual a 1; março de 1999, quando a plantação encontrava-se desenvolvida e as folhas verdes apresentavam um IAF igual a 2,4. Os fluxos de calor sensível seguem a marcha diária da radiação solar incidente e os valores máximos em outubro (200Wm$^{-2}$) e março (250Wm$^{-2}$) foram da mesma ordem. Em outubro a menor energia disponível para o aquecimento da superfície foi compensada pelo menor albedo (solo nú) em relação à março.



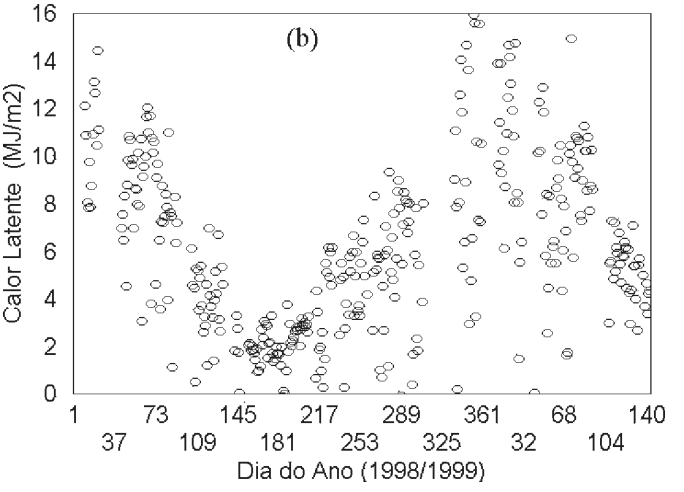




Figura 5 – Totais diurnos dos fluxos (MJm$^{-2}$) de: (a) calor sensível; (b) calor latente, observados sobre a cultura de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999.

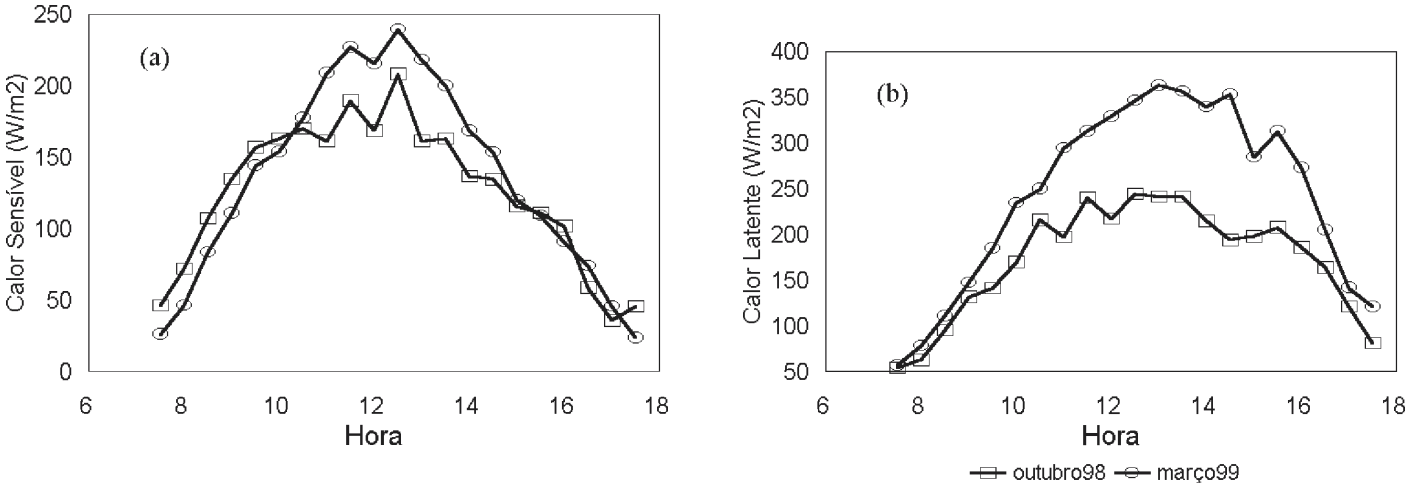



Figura 6 – Ciclos diurnos médios dos fluxos ($Wm^{-2}$) de: (a) calor sensível; (b) calor latente, medidos em outubro de 1998 e março de 1999, sobre cana-de-açúcar.

As diferenças foram mais marcantes com relação ao ciclo diurno de LE (Figura 6b), cujos máximos foram da ordem de $250Wm^{-2}$ em outubro, e $350Wm^{-2}$ em março. Os fluxos médios integrados foram $6,5MJm^{-2}$ ($2,7mmdia^{-1}$) e $9,2MJm^{-2}$ ($3,8mmdia^{-1}$), respectivamente; um aumento de 41% na evapotranspiração, similar ao obtido por Denmead et al. (1997), na Austrália, que observaram para IAF entre 0,7 e 2,5 totais de evapotranspiração entre $2,5mmdia^{-1}$ e $3,5\ mmdia^{-1}$, sobre rebrota de cultivo colhido crú (sem queima).

A condutância ao transporte de vapor de água pelo dossel ($\mathbf{g}_c$), que é o inverso da resistência ($1/\mathbf{r}_c$), é apresentada na Figura 7. Em outubro de 1998 com o início da estação chuvosa, e devido à cobertura parcial do solo, a condutância estimada integra tanto a parte fisiológica (estômatos) quanto da superfície (evaporação), ao contrário do observado em março de 1999, quando a maior contribuição sem dúvida foi da vegetação. De forma geral, os valores de $\mathbf{g}_c$ variaram em torno de 0,1 e 0,3 mol $m^{-2}s^{-1}$, em outubro e março, respectivamente, e foram similares aos dados obtidos através de porometria por Denmead et al. (1993), e Du et al., (1996).

## 3.3- Fluxos de Dióxido de Carbono ($CO_2$)

Os totais diários dos fluxos de $CO_2$ observados através do sistema de covariância de vórtices, que representam o balanço das trocas entre o sistema solo-planta e a atmosfera, encontram-se na Figura 8. Antes da colheita (**q**) em 1998 foram medidos valores máximos absolutos de fixação de $-60\ gCO_2m^{-2}$, cujo sinal negativo representa um fluxo da atmosfera para a vegetação. Após a colheita (**q**) os fluxos tornaram-se positivos, indicando que o solo e as plantas perderam mais $CO_2$ do que foi absorvido; este período estendeu-se até o dia 186 de 1998, quando o sinal voltou a ser negativo. Durante os meses de fevereiro e março de 1999 foram observados novamente valores de máximos absolutos de fixação de $-56gCO_2m^{-2}$.

O total de $CO_2$ assimilado pela plantação ao longo dos 405 dias de ciclo, obtido através da determinação dos teores de carbono nas amostras de biomassa aérea, foi de $(7,8\pm1,6)kgCO_2m^{-2}$. Os totais diários dos fluxos de $CO_2$ somados aos totais do efluxo de $CO_2$ do solo (Rocha et al., 2000), após o dia 186 de 1998, incluindo-se os períodos sem medidas, estimados através da prévia variação diurna média (Falge et al., 2001), foi $6,2\ kgCO_2m^{-2}$, cuja diferença (-15%) em relação à biomassa aérea é da mesma ordem do

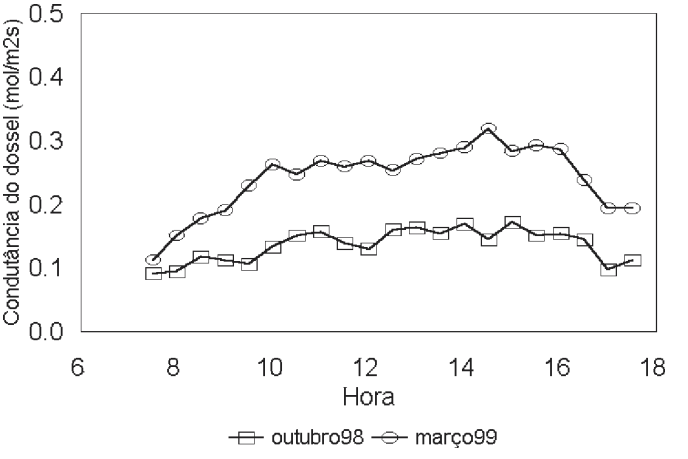



Figura 7 – Ciclos diurnos médios da condutância do dossel ($molm^{-2}s^{-1}$), em cultivo de cana-de-açúcar, relativos à outubro de 1998, e março de 1999.

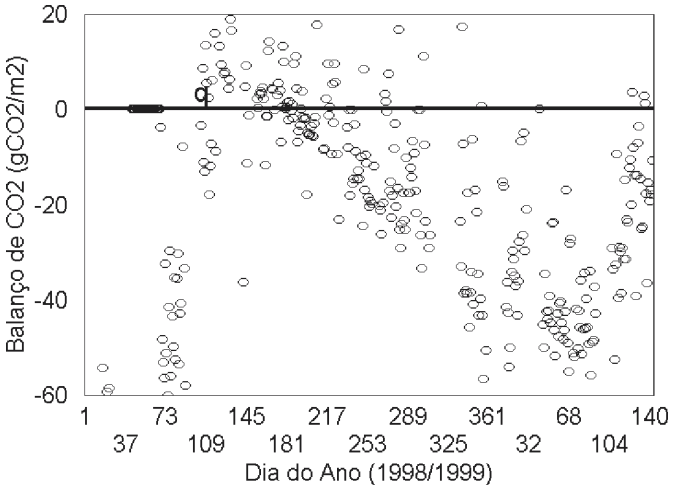



Figura 8 – Totais diários dos balanço de $CO_2$ ($gCO_2m^{-2}$), medidos sobre cultivo de cana-de-açúcar, ao longo do ciclo 1998-1999.

coeficiente de variação (±20%), de acordo com as observações de Dugas et al. (1999), realizadas em cultivos de gramíneas no Texas.

Os ciclos diurnos médios da fotossíntese líqüida ($A_n$) e concentração de $CO_2$ na atmosfera encontram-se na Figura 9. As estimativas de $A_n$ (Figura 9a) foram obtidas através dos valores absolutos do balanço de $CO_2$ observados durante o dia, adicionando-se o efluxo de $CO_2$ do solo (Rocha et al., 2000). A assimilação máxima (por área de solo) em outubro foi em média 20 $\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$, e em março foi 45$\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$; de acordo com o aumento no índice de área foliar de 1 para 2,4. O ciclo diurno da concentração de $CO_2$ na atmosfera (Figura 9b) indicou o acúmulo durante a noite, devido às concentrações mais elevadas no início da manhã ($380\mu molmol^{-1}$), e o decréscimo ao final da tarde ($350\mu molmol^{-1}$).

A importância das parametrizações mais realistas da condutância do dossel ($\mathbf{g_c}$) tem sido ressaltada do ponto de vista observacional e de modelagem (Wright et al., 1995; Sellers et al., 1996; Cox et al., 1998). No modelo desenvolvido por Ball et al.(1987), $\mathbf{g_c}$ apresenta uma relação linear com o índice ($h_s*A_n/C_s$), denominado de índice BWB; onde os termos $h_s$ e $C_s$ representam a umidade relativa e a concentração de $CO_2$ na superfície das folhas, e $A_n$ é a fotossíntese líqüida, permitindo a incorporação simultânea dos fluxos de $CO_2$ e vapor de água nos esquemas de transferência superfície-atmosfera.

O índice empírico BWB além de possibilitar a integração entre a fotossíntese e $\mathbf{g_c}$, indiretamente representa as funcionalidades com relação à temperatura foliar ($h_s$) e ao fluxo de radiação ($C_s$), realçando o papel da camada limite foliar como fator determinante.

Na Figura 10 a relação entre $\mathbf{g_c}$ e o índice BWB foi obtida sobre o cultivo de cana-de-açúcar nos meses de outubro de 1998 e março de 1999, e é comparada aos resultados de Collatz et al. (1992), para folhas de milho, cujos os valores dos coeficientes angular (m=3) e linear (b=0,04) não diferiram dos ajustes efetuados para os meses de outubro e março. Os pontos relativos à $\mathbf{g_c}$ maiores do que 0,5 mol $m^{-2}s^{-1}$ não foram considerados, pois representavam a vegetação e ou solo parcialmente molhados (Polley et al., 1992).

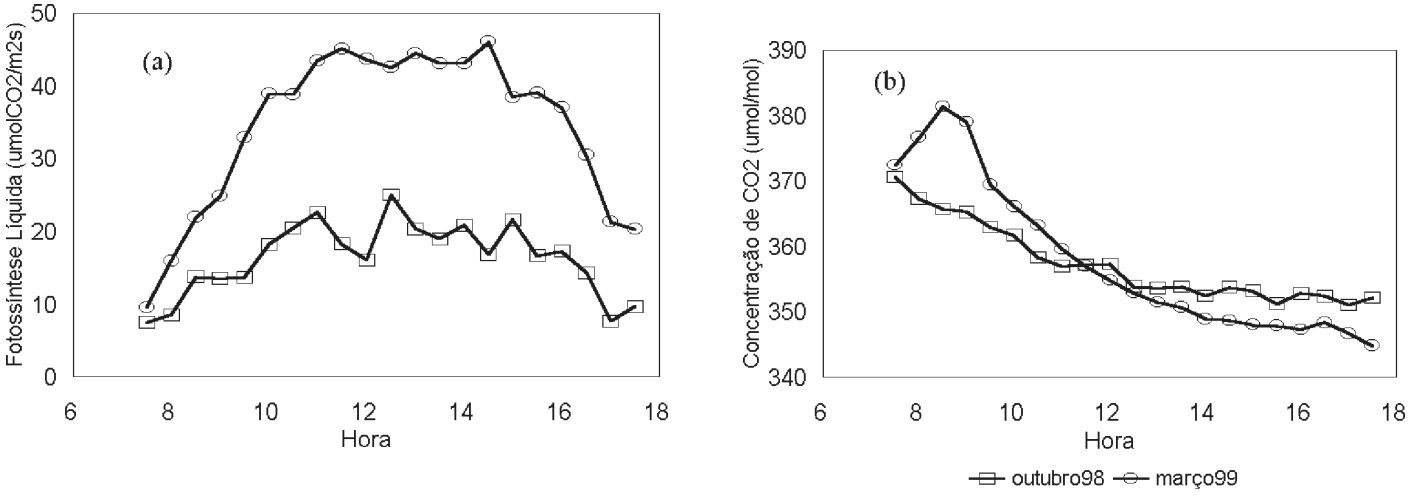



Figura 9 – Ciclos diurnos médios observados sobre cultivo de cana-de-açúcar em outubro de 1998 e março de 1999 de: (a) fotossíntese líqüida ($\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$); (b) concentração de $CO_2$ no ar ($\mu molmol^{-1}$).

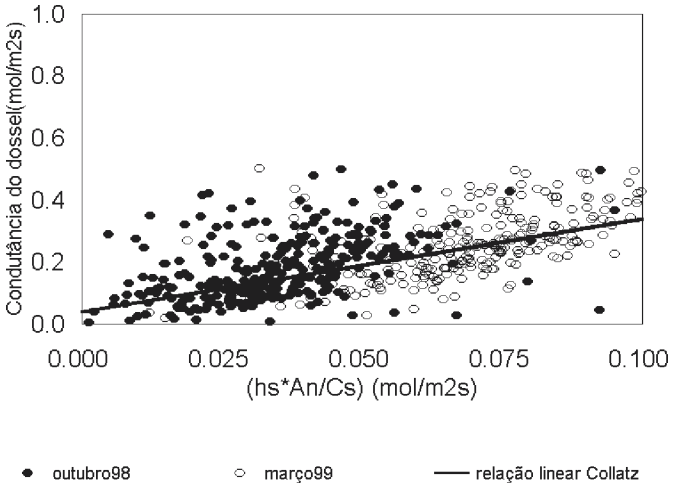



Figura 10 – Relação entre a condutância do dossel (mol $m^{-2}s^{-1}$) e o índice ($h_s$*$A_n$/$C_s$), observados sobre cultivo de cana-de-açúcar, nos meses de outubro de 1998 e março de 1999. A relação linear proposta por Collatz et al. (1992) também é apresentada.

## 4- CONCLUSÕES

A observação dos fluxos turbulentos de momento e componentes da radiação solar sobre o cultivo de cana-de-açúcar nas suas diferentes fases, possibilitaram a quantificação das alterações aerodinâmicas e do albedo da superfície, e a influência da sazonalidade. Estas características da plantação encontraram-se temporalmente correlacionadas, tornando viável a sua inferência através das técnicas do sensoreamento remoto (Li e Moreau, 1996; Rasmussen, 1997).

Os totais dos fluxos de vapor de água, acumulados ao longo do ciclo da plantação, permitiram a contabilização dos balanços de água entre a vegetação e a atmosfera, e demonstraram as discrepâncias entre as estimativas de evapotranspiração normalmente utilizadas, mesmo levando-se em conta os coeficientes de cultura. Portanto o adequado planejamento de irrigação e manejo dos recursos hídricos pode ser substancialmente aprimorado.

O balanço de carbono obtido durante o ciclo da cultura possibilitou a adequada contabilização da fixação de $CO_2$, no solo e vegetação, e demonstrou importância do método, principalmente quando a verificação não é factível, como no caso de florestas naturais.

Através do dados experimentais verificaram-se as parametrizações utilizadas nos modelos de transferência solo-planta-atmosfera (Sellers et al., 1996), particularmente com relação à condutância do dossel ao transporte de $CO_2$ e vapor de água, que foi adequadamente representada pelo modelo de plantas do tipo $C_4$ (Collatz et al., 1992).

Estimativas mais corretas da fotossíntese, evapotranspiração e crescimento dos cultivos agrícolas dependem primordialmente da adequada representação da condutância da superfície, que regula as trocas entre o dossel e a atmosfera. Num ano com baixa demanda evaporativa do ar, Thorgeirsson e Soegaard (1999) foram capazes de simular o ciclo da cevada com base na curva de fotossíntese em relação à radiação absorvida; entretanto, no ano seguinte, que foi mais seco, a simulação só foi possível através da incorporação do modelo de condutância.

## 5- AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho só foi possível devido aos recursos da Embrapa-Meio Ambiente, FAPESP/BIOTA e CNPq, e à disponibilização da área experimental pela Companhia Energética Santa Elisa.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFONSI, R.R.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. *In*: **Cana-de-Açúcar cultivo e utilização.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.42-55.

BALDOCCHI, D.; FALGE, E.; GU, L.; OLSON, R.; HOLLINGER, D.; RUNNING, S.; ANTHONI, P.; BERNHOFER, C.; DAVIS, K.; EVANS, R.; FUENTES, J.; GOLDSTEIN, A.; KATUL, G.; LAW, B.; LEE, X.; MALHI, Y.; MEYERS, T.; MUNGER, W.; OECHEL, W.; PAW U, K.T.; PILEGAARD, K.; SCHMID, H.P.; VALENTINI, R.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.82, n.11, p.2415-2434, 2001.

BALL, J.T.; WOODROW, I.E.; BARRY, J.A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. *In*: **Progress in photsynthesis research.** Dordrecht : Martinus-Nijhoff, 1987. v. 4, p.221-224.

BASTABLE, H.; SHUTTLEWORTH, W.J.; DALLAROSA, R.L.G.; FISCH, G.; NOBRE, C.A. Observations of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. **Int. J. Climatol.**, v.13, n.7, p.783-796, 1993.

BETTS, A.K.; BALL, J.H.; BELJAARS, A.C.M.; MILLER, M.J.; VITERBO, P.A. The land surface-atmosphere interaction: a review on observational and global modeling perspectives. **J. Geophys. Res.-Atmos**, v.101, n.D3, p.7209-7225, 1996.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; FRIBORG, T.; LEVY, P.E. Models of $CO_2$ and water vapour fluxes from sparse millet crop in the Sahel. **Agr. Forest. Meteorol**., p.93, n.1, p.7-26, 1999.

BOUGEAULT, P. Parameterization schemes of land-surface processes for mesoscale atmospheric models. In: SCHMUGGE, T.J.; ANDRÉ, J.C. (ed.). **Land surface evaporation.** New York : Springer-Verlag, 1991. p.55-92.

CAIN, J.D. **Modelling evaporation from plant canopies**. Wallingford : Institute of Hydrology, 1998. 50 p. (Report Nº 32)

COLLATZ, G.J.; RIBAS-CARBO, M.; BERRY, J. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of $C_4$ plants. **Aust. J. Plant Physiol**., v.19, n.5, p.519-538, 1992.

COX, P.M.; HUNTINGFORD, C.; HARDING, R.J. A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. **J. Hydrol**., v.212-213, n.1-4, p.79–94, 1998.

DENMEAD, O.T.; FRENEY, J.R.; DUNIN, F.X.; JACKSON, A.V.; REYENGA, W.; SAFFIGNA, P.G.; SMITH, J.W.B.; WOOD, A.W. Effect of canopy development on ammonia uptake and loss from sugarcane fields fertilized with urea. **Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol**., v.15, p.285-292, 1993.

DENMEAD, O.T.; MAYOCCHI, C.L.; DUNIN, F.X. Does green cane harvesting conserve soil water? **Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol**., v.19, p.139-146, 1997.

DU, Y.C.; KAWAMITSU, Y.; NOSE, A.; HIYANE, S.; MURAYAMA, S.; WASANO, K.; UCHIDA, Y. Effects of water stress on carbon exchange rate and activities of photosynthetic enzymes in leaves of sugarcane (*Saccharum* sp.). **Aust. J. Plant Physiol.**, v.23, n.6, p.719-726, 1996.

DUGAS, W.A; HEUER, M.L.; MAYEUX, H.S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. **Agr. Forest. Meteorol**., v.93, n.2, p.121-139, 1999.

FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; OLSON, R.; ANTHONI, P.; AUBINET, M.; BERNHOFER, C.; BURBA, G.; CEULEMANS, R.; CLEMENT, R.; DOLMAN, H.; GRANIER, A.; GROSS, P.; GRÜNWALD, T.; HOLLINGER, D.; NIELS-OTTO, Jensen; KATUL, G.; KERONEN, P.; KOWALSKI, A; TA LAIM, C.; LAW, B.E.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MOORS, E.; MUNGER, J.W.; PILEGAARD, K.; RANNIK, Ü.; REBMANN, C.; SUYKER, A.; TENHUNEN, J.; TU, K.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agr. Forest. Meteorol**., v.107, n.1, p.43–69, 2001.

GASH, J.H.C. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements. **Bound.-Lay. Meterol.**, v.35, n.4, p.409-413, 1986.

GOULDEN, M.L.; MUNGER, J.W.; FAN, S.M.; DAUBE, B.C.; WOFSY, S.C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, v. 2, n.3, p.169-182, 1996.

GRACE, J.; LLOYD, J.; MIRANDA, A.C.; MIRANDA, H.; GASH, J.H.C. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over a $C_4$ pasture in south-western Amazonia (Brazil). **Aust. J. Plant Physiol**., v.25, p.519-530, 1998.

KAIMAL, J.C.; FINNIGAN, J.J. **Atmospheric boundary layer flows.** New York : Oxford University Press, 1994. 289p.

LAW, B.E.; BALDOCCHI, D.D.; ANTHONI, P.M. Below-canopy and soil $CO_2$ fluxes in a ponderosa pine forest. **Agr. Forest. Meteorol**., v.94, p.171–188, 1999.

LI, Z.; MOREAU, L. A new approach for remote sensing of canopy-absorbed photosynthetically active radiation I: total surface absorption. **Remote Sens. Environ**., v.55, p.175-191, 1996.

MACHADO, E.C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. *In*: **Cana-de-Açúcar: c**ultivo e utilização. Campinas : Fundação Cargill, 1987. p.56-87.

MEYERS, T.P. A comparison of summertime water and CO2 fluxes over rangeland for well watered and drought conditions. **Agr. Forest. Meteorol**., v.106, p.205-214, 2001.

MIRANDA, A.C.; MIRANDA, H.S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; FRANCEY, R.J.; MCINTYRE, J.A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. **Plant, Cell and Environment,** v.20, p.315-328, 1997.

MONCRIEFF, J.B.; MASSHEDER, J.M.; DE BRUIN, J.; ELBERS, J.; FRIBORG, T.; HUESUNKVELD, B.; KABAT, P.; SCOTT, S.; SOEGAARD, H.; VERHOEF, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, v.188-189, p.589-611, 1997a.

MONCRIEFF, J.B.; MONTENY, B.; VERHOEF, A.; FRIBORG, T.; ELBERS, J.; KABAT, P.; BRUIN, H. de; SOEGAARD, H.; JARVIS, P.G.; TAUPIN, J.D. Spatial and temporal variations in net carbon flux durin HAPEX-Sahel. **Journal of Hydrology**, v.188-189, p.563-588, 1997b.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. London : Edward Arnold, 1991. 290 p.

MUTTON, M.A.; MUTTON, M.J.R.; BARBOSA, V. Efeito maturador da aplicação de glifosate em cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.)-comportamento agrotecnológico. *In*: CONGRESSO STAB, 6., 1996, Maceió. **Anais...** p.409-416.

O´MAY, M.; IZUNO, F.T. Evaluation of sugarcane evapotranspiration from watertable data in the everglades agricultural area. **Agr.Water Manage.**, v.27, p.309-309, 1995.

POLLEY, H.W.; NORMAN, J.M.; ARKEBAUER, T.J.; WALTER-SHEA, E.A.; GREEGOR, D.H.; BRAMER, B. Leaf gas exchange of *Andropogon gerardii* Vitman, *Panicum virgatum* L., and *Sorghastrum nutans* (L.) Nash in Tallgrass Prairie. **J.Geophys.Res**., v.97, n.D17, p.18837-18844, 1992.

RASMUSSEN, M.S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter-annual variability. **Int. J. Remote Sensing**, v.5, p.1059-1077, 1997.

ROBERTSON, M.J.; BONNET, G.D.; HUGHES, R.M.; MUCHOW, R.C.; CAMPBELL, J.A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Aust. J. Plant Physiol**., v.25, p.819-828, 1998.

ROCHA, H.R. **Relatório de Pesquisa**. São Paulo, 2001. Projeto FAPESP 99/11215-9.

ROCHA, H.R.; CABRAL, O.M.R.; SILVA DIAS, M.A.F.; LIGO, M.A.V.; ELBERS, J.A.; FREITAS, H.C.; VON RANDOW, C.; BRUNINI, O. Atmospheric $CO_2$ fluxes and soil respiration measurements over sugarcane in southeast Brazil. *In*: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; STEWART, B.A. (Eds.). **Global climate change and tropical ecosystems**. Boca Raton : CRC Press, 2000. p.405-414.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. *In*: **Cana-de-Açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 373-431.

SCHUEPP, P.H.; LECLERC, M.Y.; MACPHERSON, J.I.; DESJARDINS, R.L. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. **Bound.-Lay. Meteorol**., v.50**,** n.1-4, p.355-373, 1990.

SELLERS, P.J.; SHUTTLEWORTH, J.; DORMAN, J.; DALCHER, A.; ROBERTS, J.M. Calibrating the Simple Biosphere Model for Amazonian forest using field and remote sensing data. Part I: Average calibration with field data. **J. Clim. Appl. Meteorol**., v.28, p.727-759, 1989.

SELLERS, P.J.; RANDALL, D.A.; COLLATZ, G.J.; BERRY, J.A.; FIELD, C.B.; DAZLICH, D.A.; ZHANG, C.; COLLELO, G.D.; BOUNOUA, L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: model formulation. **Journal of Climate**, v.9, p. 676-705, 1996.

SENE, K.J. Parameterisations for energy transfers from a sparse vine crop. **Agr. Forest. Meteorol**., v.71, p.1-18, 1994.

SHUTTLEWORTH, W.J.; GURNEY, R.J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. **Q. J. Roy. Meteor. Soc**., v.116, p.497-519, 1992.

THORGEIRSSON, H.; SOEGAARD, H. Simulated carbon dioxide exchange of leaves of barley scaled to the canopy and compared to measured fluxes. **Agr. Forest. Meteorol**., v.98-99, p.479-489, 1999.

TWINE, T.E.; KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M.; COOK, D.R.; HOUSER, P.R.; MEYERS, T.P.; PRUEGER, J.H.; STARKS, P.J.; WESELY, M.L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over grassland. **Agr. Forest. Meteorol**., v.103, p.279-300, 2000.

WRIGHT, I.; GASH, J.H.C.; ROCHA, H.R.; SHUTTLEWORTH, W.J.; NOBRE, C.A.; MAITELLI, G.T.M.; ZAMPARONI, C.A.G.P.; CARVALHO, P.R.A. Dry season micrometeorology of central Amazonian ranchland. **Q. J. Roy. Meteor. Soc**., v.118, p.1083-1099, 1992.

WRIGHT, I.; MANZI, A.O.; ROCHA, H.R. Surface conductance of Amazonian pasture: model application and calibration for canopy climate. **Agr. Forest. Meteorol**., v.75, p.51-70, 1995.