

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ADOLPHO EMANUEL QUINTELA DA ROCHA

**FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CO<sub>2</sub> EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR POR  
MÉTODOS MICROMETEOROLÓGICOS**

Rio Largo – AL

2015

ADOLPHO EMANUEL QUINTELA DA ROCHA

**FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CO<sub>2</sub> EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR POR  
MÉTODOS MICROMETEOROLÓGICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Dr. José Leonaldo de Souza

Rio Largo – AL

2015

**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecário: Roselito de Oliveira Santos**

R672f Rocha, Adolpho Emanuel Quintela da.  
Fluxos de energia, água e CO<sub>2</sub> em cultivo de cana-de-açúcar por métodos micrometeorológicos / Adolpho Emanuel Quintela da Rocha. – Maceió, 2015.  
82 f. il.

Orientador: José Leonaldo de Souza.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas. CECA. Rio Largo, 2015.

Bibliografia: f. 72-82.

1. Balanço de radiação . 3. Balanço de energia. 4. Correlação de vórtices turbulentos . I. Título.

CDU: 633.61

TERMO DE APROVAÇÃO

**ADOLPHO EMANUEL QUINTELA DA ROCHA**

(Matrícula 13130128)

**"FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CO<sub>2</sub> EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM  
MÉTODOS MICROMETEOROLÓGICOS".**

Dissertação apresentada e avaliada pela banca examinadora em 24 de fevereiro de 2015, como parte dos requisitos para obtenção de Mestre em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal do Programa de Pós-Graduação em Agronomia "Produção Vegetal" da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.

  
Prof. Dr. RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR  
Membro

  
Prof. Dr. LAURICIO ENDRES  
Membro

  
Prof. Dr. GUSTAVO BASTOS LYRA  
Membro

  
Prof. Dr. JOSÉ LEONALDO DE SOUZA  
Presidente

RIO LARGO – AL  
Fevereiro/2015

Aos meu pais, Manoel Coelho e Edla Maria e ao meu irmão, Álvaro José;  
Ao meu tio, Rinaldo Nunes (*In memoriam*), e minha avó, Iracema Nunes;  
À minha namorada Luana Darling;

**Dedico!**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida abençoada e importantes conquistas em minha vida profissional e pessoal;

Ao meu orientador, prof. Dr. José Leonaldo de Souza, pelos conselhos, ensinamentos, paciência, confiança, dedicação, amizade e humildade.

Ao professor Dr. Guilherme Lyra pela amizade, confiança, oportunidades e orientação desde o início da graduação;

Ao professor Dr. Ricardo Araújo pelas discussões, sugestões e ajuda na instalação do experimento;

Ao professor Dr. Gustavo Bastos Lyra, pelas sugestões, orientação e por ter aceitado o convite para compor a banca examinadora;

Ao professor Laurício Endres, pelas sugestões, apoio por ter aceitado o convite para compor a banca examinadora;

Aos eternos amigos do grupo de pesquisa Agrometeorologia e Recursos Naturais: Anthony Carlos, André Carvalho, Constantino Júnior, Franklin dos Anjos, Ivomberg Magalhães, Joelmir Albuquerque, Marshall Victor, Pedro Luã e Renato Araújo;

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia pelos ensinamentos;

Ao corpo técnico do Programa de Pós-Graduação pelas informações repassadas durante o curso;

Aos colegas de disciplina do Mestrado;

À Usina Santa Clotilde pelo apoio e parceria;

Ao projeto ICNT BIOETANOL pela aquisição de equipamento.

*“Nenhuma grande descoberta foi feita jamais sem um palpite ousado!”*

*Isaac Newton*

## RESUMO

O entendimento dos processos biofísicos que ocorrem entre as culturas agrícolas e a atmosfera é essencial para a adoção de práticas de manejo adequadas, com vistas ao aumento da produtividade. Neste estudo, objetivou-se avaliar a variação dos componentes do balanço de radiação, energia e CO<sub>2</sub> em cultivo de cana-de-açúcar na região dos Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas, Brasil. Medidas micrometeorológicas foram realizadas entre 7 de junho e 17 de novembro de 2013 em área comercial de cana-de-açúcar (variedade RB867515), ciclo cana-planta, com plantio em 26 de março de 2013. As determinações dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ) e sensível (H) e a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) foram realizadas pelo método de correlação de vórtices turbulentos (EC). Os componentes do balanço de radiação foram medidos por um saldo radiômetro instalado acima do dossel da cultura. Além disso,  $\lambda E$  foi estimado pelo método do balanço de energia - Razão de Bowen (BERB) considerando duas abordagens, a primeira com estimativa do gradiente de temperatura do ar em dois níveis e a segunda utilizando a temperatura da superfície a partir das medidas do saldo radiômetro (SBERB).  $\lambda E$  também foi estimado como resíduo do balanço de energia a partir das determinações do fluxo de calor sensível (H) por EC (ECR), por uma modificação do método da razão de Bowen (MBERB), que combina o BERB com medidas através de EC, e pela abordagem proposta no Boletim FAO56. As condições de nebulosidade foram determinadas pelo índice de claridade (Kt), calculado a partir da razão entre a irradiação solar global (H<sub>g</sub>) e no topo da atmosfera (H<sub>o</sub>). A partir dos resultados, observou-se que o albedo e a relação entre o saldo de radiação (R<sub>n</sub>) e a radiação solar global (R<sub>g</sub>) e o balanço de ondas longas (BOL) e R<sub>g</sub> não foram influenciadas pelas condições de nebulosidade. Durante o período de medição a maior parte da energia disponível à superfície (63%) foi destinada para o processo de evapotranspiração. A variação diurna dos componentes do balanço de energia foi afetada pelas condições de nebulosidade e pela disponibilidade hídrica, sendo a energia disponível dividida quase que igualmente entre  $\lambda E$  e H durante o período de estiagem. Em relação aos métodos de estimativa de  $\lambda E$ , o BERB mostrou a melhor concordância com as determinações por EC, seguido pelo ECR. Os métodos FAO56 e MBERB apresentaram menor concordância com EC. A variação diurna de NEE seguiu o curso da radiação, com maior eficiência quântica sob céu parcialmente nublado. Os totais diários de NEE foram dependentes das condições de nebulosidade e disponibilidade hídrica.

**Palavras-chave:** Balanço de radiação. Balanço de energia. Correlação de vórtices turbulentos e *Saccharum spp.*

## ABSTRACT

The understanding of biophysical processes that occur between the crops and the atmosphere is essential for the adoption of appropriate management practices, with a view to increasing yield. This work aimed to evaluate the variation of radiation, energy and CO<sub>2</sub> balance components in sugarcane cultivation in the Coastal Plains of Alagoas, Brazil. Micrometeorological measurements were made from Jun 07 to Nov 17, 2013, in a commercial area of sugarcane (RB 867515 variety), plant cane cycle, with planting on 26 Mar, 2013. The determination of the latent ( $\lambda E$ ) and sensible (H) heat fluxes and net ecosystem exchange (NEE) were made by the eddy covariance method (EC). The radiation balance components were measured by a net radiometer installed above the plant canopy. In addition,  $\lambda E$  was estimated by Bowen ratio – energy balance (BREB) considering two approaches, the first with estimate of the air temperature gradient on the two levels and the second using the surface temperature from measurements of the net radiometer (SBREB).  $\lambda E$  was also estimated residue of the energy balance from the H determinations by EC (ECR), by modification of the BREB (MBREB), which combines the BREB with EC determinations, and the approach proposed in the FAO 56 Bulletin. The cloudiness conditions were determined from the clearness index (Kt), calculated from the relationship between global solar radiation (H<sub>g</sub>) and at the top of the atmosphere (H<sub>o</sub>). From the results, it was observed that the albedo and the relationship between the net radiation (R<sub>n</sub>) and R<sub>g</sub> and long wave balance (BOL) and R<sub>g</sub> were not influenced by the cloudiness conditions. During the measurement period the most of the available energy at the surface (63%) was designed for the evapotranspiration process. The diurnal variation of the energy balance components was affected by cloudiness conditions and water available, with an available energy divided almost equally between  $\lambda E$  and H during dry season. In the relation  $\lambda E$  estimation methods, the BREB has better agreement with determinations by EC, followed by ECR. The FAO56 and MBERB methods showed less agreement with EC. The diurnal variation of the NEE followed the course of radiation, with higher quantum efficiency under partly cloudy sky. The daily totals of NEE were affected by cloudiness conditions and water available.

**Key words:** Radiation balance. Energy balance. Eddy Covariance and *Saccharum spp.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> - Mapa do estado de Alagoas e localização da área experimental em Rio Largo - AL.<br>.....   | 29 |
| <b>Figura 2</b> - Torre meteorológica (A), saldo radiômetro (B) e sensor de umidade e temperatura do ar (C) sobre o dossel da cana-de-açúcar.....  | 31 |
| <b>Figura 3</b> - Equipamento de correlação de vórtices turbulentos sobre o cultivo de cana-de-açúcar. ....  | 33 |
| <b>Figura 4</b> - Sensores de umidade do solo inseridos nas profundidades de 0,0-0,30 m e 0,30-0,60 m. ....  | 38 |
| <b>Figura 5</b> - Variação diária da temperatura do ar mínima - $T_n$ , máxima - $T_x$ e média - $T_a$ (A), irradiação solar global - $H_g$ (B), déficit de pressão de vapor - DPV (C), velocidade do vento - $u_z$ (C), armazenamento de água no solo - ARM e precipitação pluvial - P (D). Armazenamento de água no solo na capacidade de campo ( $A_{cc}$ ), umidade crítica ( $A_{uc}$ ) e ponto de murcha permanente ( $A_{pm}$ ). .... | 42 |
| <b>Figura 6</b> - Altura do dossel (A) e índice de área foliar (B) da cana-de-açúcar em função de dias após o plantio (DAP) na região de Rio Largo - AL. Barras verticais representam o desvio padrão .....  | 43 |
| <b>Figura 7</b> - Irradiância solar global ( $R_g$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ), irradiância solar refletida ( $R_r$ ), balanço de ondas longas (BOL) e albedo para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade). ....  | 44 |
| <b>Figura 8</b> - Irradiância solar global ( $R_g$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ), irradiância solar refletida ( $R_r$ ), balanço de ondas longas (BOL) e albedo para a cana-de-açúcar durante os dias 18/10 (parcialmente nublado) e 31/10/2013 (sem nebulosidade) .....  | 46 |
| <b>Figura 9</b> - Relação entre os fluxos de calor latente obtidos pela técnica de correlação de vórtices turbulentos ( $\lambda E-EC$ ) e corrigidos por WPL ( $\lambda E-EC_{cor.}$ ) para a cana-de-açúcar .....  | 47 |
| <b>Figura 10</b> - Fechamento do balanço de energia considerando os fluxos diurnos totais (A), manhã (B), tarde (C) e após do forçamento do fechamento durante o cultivo da cana-de-açúcar. ....   | 49 |
| <b>Figura 11</b> - Variação diurna do saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxos de calor no solo (G), latente ( $\lambda E$ ) e sensível (H) para a cana-de-açúcar e durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).....   | 50 |

- Figura 12** - Variação diurna do saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxos de calor no solo ( $G$ ), latente ( $\lambda E$ ) e sensível ( $H$ ) para a cana-de-açúcar e durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva)..... 52
- Figura 13** - Plotagem de Bland e Altman para os limites de concordância entre os valores de fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) determinados pelo método da correlação de vórtices turbulentos ( $EC$ ) e estimados pela razão de Bowen ( $BERB$ ), razão de Bowen com temperatura da superfície ( $SBERB$ ), correlação de vórtices turbulentos residual ( $ECR$ ) e razão de Bowen modificado ( $MBERB$ ). Limite superior ( $LSC$ ) e inferior de confiança ( $LIC$ ) e desvio médio ( $DM$ )..... 54
- Figura 14** - Comparação dos fluxos de calor latente determinado pelo método da correlação de vórtices turbulentos ( $EC$ ) e razão de Bowen ( $BERB$ ), razão de Bowen com temperatura da superfície ( $SBERB$ ), correlação de vórtices turbulentos residual ( $ECR$ ) e razão de Bowen modificado ( $MBERB$ ). ..... 55
- Figura 15** - Relação entre a troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema obtida pela técnica da correlação de vórtices turbulentos ( $NEE-EC$ ) e corrigida por WPL ( $NEE-EC_{cor.}$ ) para a cana-de-açúcar. .... 58
- Figura 16** - Relação entre a troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema ( $NEE$ ) e irradiância solar fotossintética interceptada ( $IR_f$ ) durante o ciclo da cana-de-açúcar.  $\alpha$  eficiência quântica e fluxo máximo de  $CO_2$  ( $F_m$ ). ..... 59
- Figura 17** - Relação entre a velocidade de fricção diária média ( $u^*$ ,  $m\ s^{-1}$ ) e a troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema ( $NEE$ ) para a cultura da cana-de-açúcar..... 59
- Figura 18** - Valores diários da troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema -  $NEE$  (A) e irradiância solar fotossintética interceptada -  $IH_f$  (B) em função de dias após o plantio em intervalos de cobertura do solo ..... 61
- Figura 19** - Variação diurna da troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema ( $NEE$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET$ ) e irradiância solar fotossintética interceptada ( $IR_f$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07/2013 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade)..... 62
- Figura 20** - Variação diária da eficiência no uso da água ( $EUA$ ) e do déficit de pressão de vapor ( $DPV$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade)..... 63
- Figura 21** - Variação diurna da troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema ( $NEE$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET$ ) e irradiância solar fotossintética

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
|                  | interceptada ( $IR_f$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10/2013 (pré-chuva) e 20/10/2013 (após chuva).....   | 65 |
| <b>Figura 22</b> | - Variação diária da eficiência no uso da água (EUA) e do déficit de pressão de vapor (DPV) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva).....   | 66 |
| <b>Figura 23</b> | - Condutância aerodinâmica ( $g_{aw}$ ), condutância do dossel para vapor d'água ( $g_{cw}$ ) e velocidade do vento ( $u_z$ ) durante três dias ao longo do ciclo da cana-de-açúcar.  | 68 |
| <b>Figura 24</b> | - Relação entre o déficit de pressão de vapor e a condutância do dossel para vapor d'água normalizada pelo índice de área foliar - $g_{cw}/IAF$ (A) e irradiância solar fotossintética interceptada - $g_{cw}/IR_f$ (B) durante o ciclo da cana-de-açúcar.... | 69 |
| <b>Figura 25</b> | - Relação entre o percentual da água disponível no solo (%CAD), condutância do dossel para vapor d'água - $g_{cw}$ (A) e troca líquida de $CO_2$ do ecossistema - NEE (B) durante o ciclo da cana-de-açúcar .....   | 70 |

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Valores do grau de fechamento do balanço de energia (GFB) pela técnica da correlação de vórtices turbulentos em diversas culturas..... 27
- Tabela 2** - Coeficientes de ajuste ( $H_f$ ,  $H_i$ ,  $r$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) e de determinação ajustado ( $R^2_{aju}$ ) para o modelo logístico (altura do dossel) e log normal (IAF) em função de dias após o plantio ..... 43
- Tabela 3** - Totais diários da irradiância solar global ( $R_g$ ) e refletida ( $R_r$ ), balanço de ondas longas (BOL), saldo de radiação ( $R_n$ ) e albedo diário para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade) .... 44
- Tabela 4** - Totais diários da irradiância solar global ( $R_g$ ) e refletida ( $R_r$ ), balanço de ondas longas (BOL), saldo de radiação ( $R_n$ ) e albedo diário para a cana-de-açúcar durante os dias 18/10 (parcialmente nublado) e 31/10/2013 (sem nebulosidade).... 46
- Tabela 5** - Totais diários dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), sensível ( $H$ ) e saldo de radiação ( $R_n$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade)..... 51
- Tabela 6** - Totais diários dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), sensível ( $H$ ) e saldo de radiação ( $R_n$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva)..... 53
- Tabela 7** – Raiz do quadrado médio do erro (RMSE), coeficiente angular da reta ( $b$ ) e índice de concordância ( $d$ ) entre os fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ) pelo método da correlação de vórtices turbulentos e razão de Bowen (BERB), razão de Bowen com temperatura da superfície (SBERB), vórtices turbulentos residual (ECR) e razão de Bowen modificado (MBERB)..... 56
- Tabela 8** – Evapotranspiração acumulada (ET acumulada), média (ET média) e relação entre evapotranspiração da cana-de-açúcar e de referência (ET/ET<sub>0</sub>) durante os dias avaliados pelo método da correlação de vórtices turbulentos e estimados pela razão de Bowen (BERB), razão de Bowen com temperatura da superfície (SBERB), correlação de vórtices turbulentos residual (ECR), razão de Bowen modificado e FAO56 em cultivo de cana-de-açúcar. 56

- Tabela 9** - Valores médios da velocidade do vento ( $u_z$ ,  $m\ s^{-1}$ ) e troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema ( $NEE$ ,  $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) em função de diferentes intervalos de velocidade de fricção ( $u^*$ ,  $m\ s^{-1}$ ) durante o ciclo da cana-de-açúcar ..... 60
- Tabela 10** - Totais diários da troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema ( $NEE$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET$ ), irradiância solar fotossintética interceptada ( $I_{Hf}$ ), eficiência no uso da água ( $EUA$ ) e eficiência quântica ( $\alpha$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade) ..... 63
- Tabela 11** - Totais diários da troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema ( $NEE$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET$ ), irradiação solar fotossintética interceptada ( $I_{Hf}$ ), eficiência no uso da água ( $EUA$ ) e eficiência quântica ( $\alpha$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva)..... 66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF – Área foliar  
AFD - Água facilmente disponível  
BERB - Método do balanço de energia- razão de Bowen  
BOC - Balanço de ondas curtas  
BOL - Balanço de ondas longas  
C - Comprimento da folha +3  
CAD - Capacidade água disponível  
CH<sub>4</sub> – Metano  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono  
DAP - Dias após o plantio  
DPV - Déficit de pressão de vapor  
d<sub>0</sub> – deslocamento no plano zero  
EC - Método da correlação de vórtices turbulentos  
ECR - Método da correlação de vórtices turbulentos residual  
e<sub>a</sub> - Pressão atual de vapor d'água do ar  
Eo – emitância  
e<sub>s</sub> - Pressão de saturação de vapor d'água do ar  
ET - Evapotranspiração  
ETr - Evapotranspiração real  
ET<sub>0</sub> - Evapotranspiração de referência  
EUA - Eficiência no uso da água  
EUAc - Eficiência no uso da água para produção de colmos  
EUR - Eficiência no uso da radiação solar  
few – Fração de solo úmida exposta  
Fm – Fluxo de CO<sub>2</sub> máximo  
G - Fluxo de calor no solo  
g<sub>aw</sub> - Resistência aerodinâmica  
g<sub>cw</sub> - Resistência do dossel para vapor d'água  
GFB - Grau de fechamento do balanço de energia  
H - Fluxo de calor sensível  
ha - Hectare  
H<sub>c</sub> - Altura do dossel atual  
H<sub>f</sub> - Altura final do dossel  
Hg - Irradiação solar global  
H<sub>i</sub> - Altura inicial do dossel  
IAF - Índice de área foliar  
IHf - Irradiação solar fotossintética interceptada  
IRf - Irradiância solar fotossintética interceptada  
k - Constante de von Karman  
K - Coeficiente de extinção da luz  
K<sub>c</sub> - Coeficiente de cultura  
K<sub>cb</sub> - Coeficiente basal  
K<sub>e</sub> - Coeficiente de evaporação  
K<sub>h</sub> - Coeficiente de transferência turbulenta para calor  
K<sub>s</sub> - Coeficiente de estresse de água  
K<sub>t</sub> - Índice de claridade  
K<sub>v</sub> - Coeficiente de transferência turbulenta para vapor d'água

L - Largura da folha +3  
MBERB - Método do balanço de energia - Razão de Bowen modificado  
N - Número de folhas expandidas  
n - número de observações  
NEB - Nordeste brasileiro  
NEE - Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema  
NP - Número de perfilhos por metro  
O<sub>i</sub> - Valor observado  
P - Pressão atmosférica  
P<sub>i</sub> - Valor estimado  
 $\theta_{cc}$  - umidade volumétrica do solo na capacidade de campo  
 $\theta_{pm}$  - umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente  
r - Taxa de crescimento relativo máximo  
R<sub>a</sub> - Irradiância emitida pela atmosfera  
R<sub>d</sub> - Respiração diurna  
R<sub>g</sub> - Irradiância solar global  
RH<sub>min</sub> = Umidade relativa do ar mínima  
RMSE - Raiz do erro médio quadrático  
R<sub>n</sub> - Saldo de radiação  
R<sub>r</sub> - Irradiância solar refletida  
R<sub>s</sub> - Irradiância emitida pela superfície  
S - Área de solo ocupada por plantas  
SBERB - Método do balanço de energia - razão de Bowen com temperatura da superfície  
t - Tonelada  
TR<sub>f</sub> - Irradiância solar fotossintética transmitida  
u<sub>z</sub> - Velocidade do vento  
u\* - Velocidade de fricção  
T - Temperatura do ar  
t<sub>1</sub> - Temperatura do ar no nível 1  
t<sub>2</sub> - Temperatura do ar no nível 2  
z - Altura de medição  
Z<sub>r</sub> - Profundidade efetiva do sistema radicular  
w' - Componente vertical do vento  
WPL - Correções propostas por Webb, Pearman e Leuning

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\alpha$  – Eficiência quântica
- $\beta$  – razão de Bowen
- $c_p$  – Calor específico do ar à pressão constante
- $\Delta e$  - Gradiente de pressão de vapor
- $\Delta T$  - Gradiente de temperatura
- $\Delta$  - inclinação da curva de pressão de vapor saturado
- $\varepsilon$  - razão de peso molecular de vapor d'água/ar seco
- $\varepsilon_0$  é a emissividade
- $\gamma$  - Constante psicrométrica
- $\lambda$  – Calor latente de vaporização da água
- $\rho_a$  - Densidade do ar
- $\sigma$  - é a constante de Stefan-Boltzman

## SUMÁRIO

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>2.1</b> | <b>A cana-de-açúcar .....</b>   | <b>20</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Balanco de radiação.....</b>   | <b>21</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Evapotranspiração (ET).....</b>  | <b>23</b> |
| 2.3.1      | Método do Balanco de Energia - Razão de Bowen (BERB) .....                    | 24        |
| 2.3.2      | Método da correlação de vórtices turbulentos ( <i>Eddy Covariance</i> ) ..... | 25        |
| <b>2.4</b> | <b>Balanco de CO<sub>2</sub> em cultivos agrícolas.....</b>                   | <b>27</b> |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Área experimental.....</b>   | <b>29</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Medidas biométricas.....</b>   | <b>30</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Medidas radiométricas .....</b>  | <b>31</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Medidas micrometeorológicas.....</b>                                       | <b>32</b> |
| 3.4.1      | Método da correlação de vórtices turbulentos ( <i>Eddy Covariance</i> ) ..... | 32        |
| 3.4.2      | Balanco de energia - Razão de Bowen .....                                     | 34        |
| 3.4.3      | Razão de Bowen modificado (MBERB).....  | 35        |
| 3.4.4      | Método FAO56 – Kc “dual” .....  | 36        |
| <b>3.5</b> | <b>Armazenamento de água no solo.....</b>                                     | <b>37</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Análise estatística.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>3.7</b> | <b>Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE).....</b>              | <b>39</b> |
| <b>3.8</b> | <b>Condutâncias.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Condições ambientais e crescimento da cultura .....</b>                    | <b>41</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Componentes do balanço de radiação.....</b>                                | <b>43</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Componentes do balanço de energia .....</b>                                | <b>47</b> |
| 4.3.1      | Balanco de energia versus nebulosidade.....                                   | 49        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 4.3.2      | Balço de energia versus disponibilidade hídrica.....             | 51        |
| 4.3.3      | Comparação dos métodos de estimativa de $\lambda E$ .....        | 53        |
| <b>4.4</b> | <b>Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE).....</b> | <b>57</b> |
| 4.4.1      | NEE versus nebulosidade.....                                     | 62        |
| 4.4.2      | NEE versus disponibilidade hídrica.....                          | 64        |
| <b>4.5</b> | <b>Condutâncias.....</b>   | <b>67</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>71</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>72</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à elevada capacidade de produção de biomassa, a cana-de-açúcar é considerada uma das principais alternativas para diversificar a produção de energia, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases do efeito estufa para atmosfera. O interesse em produzir cana-de-açúcar no mundo tem aumentado às pesquisas, que visam melhor compreender a influência do ambiente sobre seu crescimento e desenvolvimento.

A compreensão dos processos biofísicos que ocorrem entre as comunidades vegetais e a atmosfera é fundamental para a determinação das necessidades hídricas e no manejo das culturas. Principalmente, devido à água ser um recurso cada vez mais escasso e disputado, e que leis restringem o seu uso demasiado. A determinação da demanda hídrica da cultura é importante, não só pela diminuição dos impactos ambientais, mas também pela otimização dos custos de produção. O manejo de irrigação é baseado nas perdas de água que ocorrem no cultivo devido à evaporação da água do solo e transpiração da cultura, que conjuntamente definem o processo de evapotranspiração (ET).

O processo de ET é controlado basicamente por fatores como radiação solar, temperatura do ar, déficit de vapor d'água do ar (DPV), velocidade do vento e propriedades físicas do solo. Entretanto, os métodos de estimativa deste processo demonstram ser dependentes das condições edafoclimáticas de cada região. Assim, o estudo comparativo de diversos métodos de estimativa com medidas reais é necessário para a recomendação dos que melhor que se adequam a cada região e cultura. Atualmente, o método de correlação de vórtices turbulentos ou “*eddy covariance*” (EC) é um dos mais utilizados para determinação direta das perdas de vapor d'água sobre superfícies vegetais e tem como vantagens não perturbar o ambiente e permitir medidas contínuas durante longos períodos, com grande capacidade de amostragem. Além disso, no Brasil estudos em cana-de-açúcar realizados com EC são escassos, e normalmente conduzidos na região Sudeste (CABRAL et al., 2003; CABRAL et al., 2012; CABRAL et al., 2013).

O método EC é baseado nas flutuações da componente vertical do vento, da temperatura do ar ou concentração de vapor d'água, para determinação dos fluxos de calor sensível (H) e latente ( $\lambda E$ ), respectivamente. Além do mais, este método permite determinações das trocas de CO<sub>2</sub> entre a cultura e a atmosfera, sendo útil para determinação de parâmetros que envolvem a fotossíntese e sua interação com a radiação solar, sobretudo

para cana-de-açúcar, cujos estudos realizados são escassos, e geralmente são avaliados no nível de folha.

De acordo com o exposto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a variação dos componentes do balanço de radiação, energia e  $\text{CO}_2$  em cultivo de cana-de-açúcar na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. E como objetivos específicos: a) analisar os padrões diurnos dos componentes do balanço de radiação em função das condições de nebulosidade e crescimento da cultura; b) analisar os padrões diurnos dos componentes do balanço de energia pelo método EC em função das condições de nebulosidade e da disponibilidade hídrica; c) Comparar as estimativas da evapotranspiração da cana-de-açúcar por EC e estimada por outros métodos micrometeorológicos; d) Analisar a variação das trocas de  $\text{CO}_2$  durante o cultivo em função do índice de área foliar, condições de nebulosidade e disponibilidade hídrica; e) Determinar a máxima troca líquida de  $\text{CO}_2$  do ecossistema e eficiência quântica da cana-de-açúcar.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura amplamente cultivada em diversas regiões do mundo e os maiores produtores são Brasil, Índia e China, com 658,8, 341,2 e 126,1 milhões de toneladas (t) produzidos em 2013, respectivamente. No Brasil, o cultivo da cana-de-açúcar compreende aproximadamente 8,8 milhões de hectares (ha), distribuídos entre as regiões Sudeste (62%), Centro Oeste (19%), Nordeste (12%), Sul (7%) e Norte (1%). No NEB, o estado de Alagoas é o maior produtor, com aproximadamente 22,5 milhões de t em aproximadamente 417 mil ha cultivados, que representa 42% do total desta região e 3% da produção nacional (CONAB, 2015; FAOSTAT, 2015).

O crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar são dependentes da interação de vários fatores meteorológicos, que incluem principalmente a disponibilidade hídrica, radiação solar, temperatura e umidade do ar. Em relação à disponibilidade hídrica (por se tratar de uma cultura de longo ciclo), em regiões cujas precipitações se concentram em determinado período com distribuição irregular, o seu cultivo requer a adoção de irrigação para suplementar a água proveniente das chuvas (INMAN-BAMBER, 2005). Em termos quantitativos, a demanda hídrica da cana-de-açúcar é variável com a região e a variedade, sendo relatados valores de 1.710 mm nas condições do Submédio do Vale do São Francisco (SILVA et al., 2012); entre 1.400 e 1.500 mm em Sindh no Paquistão (QURESHI; MADRAMOOTOO; DODDS, 2002); e entre 1448 e 1584 mm na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas (ALMEIDA et al., 2008). Considerando a eficiência no uso da água para produção de colmos (EUAc), valor igual a 7,2 kg de colmos por m<sup>3</sup> de água foi obtido no Litoral da Paraíba (FARIAS et al., 2008); e na região de Jaboticabal estimativas entre 13,3 e 14,2 kg m<sup>-3</sup> foram relatadas (BRITO; LIBARDI; GHIBERTO, 2009).

A radiação solar fornece a energia necessária para o acúmulo de matéria seca pelas plantas. A capacidade de interceptação da radiação pela cultura é dependente da taxa de desenvolvimento do dossel (INMAN-BAMBER, 1995). A eficiência na qual esta radiação interceptada é convertida em biomassa é denominada eficiência no uso da radiação (EUR), sendo reportados na literatura valores referentes à produção de biomassa em função da radiação solar global (R<sub>g</sub>) ou fotossinteticamente ativa interceptada. Considerando R<sub>g</sub>, nas condições de Pogola, África do Sul, Donaldson et al. (2008) analisaram EUR em nove cultivares de cana-de-açúcar em diversas épocas e obtiveram média de 1,40 g MJ<sup>-1</sup>, com

aumento linear à medida que a temperatura do ar se elevou entre 18 e 26°C; ainda na mesma região, Singels, Donaldson e Smit (2005) relataram medidas entre 0,8 e 1,5 g MJ<sup>-1</sup>. Na região de Juazeiro-BA, Silva et al. (2014) analisaram a EUR da cana-de-açúcar e obtiveram 1,30 g MJ<sup>-1</sup> quando considerou-se Rg e 2,67 g MJ<sup>-1</sup> para radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

A temperatura do ar exerce influência sobre o metabolismo das culturas, e consequentemente no crescimento e desenvolvimento vegetal (RUSSELLE et al., 1984). Ebrahim et al. (1998) avaliaram a influência de três condições de temperatura do ar, abaixo da ótima (15°C), ótima (27°C) e acima da ótima (45°C) sobre a cana-de-açúcar, e observaram que, as elevadas temperaturas proporcionaram praticamente o mesmo número de entrenós em relação as plantas cultivadas sob 27°C, entretanto, com redução significativa do comprimento. Enquanto que sob o regime de 15°C, houve redução no número e comprimento dos entrenós. Em relação ao acúmulo de matéria seca, houve redução de 70% sob 45°C, enquanto que sob 15°C a declínio foi de 85%. Já considerando o acúmulo de sacarose, esta foi maior a 15°C e menor a 45°C, que evidenciam a inibição do sistema de translocação de açúcar quando as plantas são submetidas a baixas temperaturas. Além disso, quando se considerou os carboidratos totais, sob 15°C também foi observado maior valor, que pode ser atribuído a menor taxa de respiração sob baixas temperaturas.

Em estudo similar, Guerra et al. (2014) avaliaram três regimes de temperatura do ar, denominadas baixas (19°C diurna e 13°C noturna), médias (29°C diurna e 23°C noturna) e altas (33°C diurna e 27°C noturna) e relataram que a eficiência fotossintética é afetada por baixas temperaturas, devido a redução da atividade da rubisco e que altas temperaturas não influenciam a eficiência fotossintética, mas reduz o diâmetro do colmo. Além disso, redução significativa no acúmulo de matéria seca do colmo também foi observada em baixas temperaturas.

## **2.2 Balanço de radiação**

A radiação solar é responsável pelo fornecimento da energia necessária para os diversos processos físicos, biofísicos e biológicos nos ecossistemas. Em cultivos agrícolas, o saldo e radiação (Rn) é o componente de maior interesse devido à sua aplicação em modelos para estimativa da evapotranspiração da cultura. A determinação de Rn é possível conhecendo-se os componentes que representam o balanço de radiação ondas curtas (BOC) e longas (BOL). O BOC é composto pela radiação solar global (Rg) e refletida (Rr); enquanto

que o BOL é definido pelas radiações emitidas pela atmosfera ( $R_a$ ) e superfície ( $R_s$ ) (MONTEITH; SCEICZ, 1961). Assim,  $R_n$  pode ser expresso pela equação 1:

$$R_n = BOC + BOL = (R_n - R_r) + (R_a - R_s) \quad (1)$$

O albedo ou coeficiente de reflexão da radiação solar expressa o percentual de  $R_g$  que é refletido pela cultura. Sua utilização é ampla, e engloba modelos de crescimento, ecoidrológicos, além de estudos de fluxo de água e energia nos ecossistemas (OGUNTUNDE; GIESEN, 2004). Os valores de albedo são dependentes do ângulo de elevação solar, presença de água, textura e composição do solo, tipo de cultura e arquitetura do dossel ou copa. Estudos demonstram que o albedo aumenta à medida que a elevação solar diminui, resultando em maiores valores no início da manhã e final da tarde, e menores próximos ao meio dia, visto que neste horário há maior absorção da radiação solar pelo interior da vegetação devido a incidência perpendicular dos raios solares (MONTEITH; SCEICZ, 1961; SOUZA; ESCOBEDO; TORNERO, 1999; OGUNTUNDE; GEISEN, 2004; ANDRÉ et al., 2010). Em relação à presença de água, o albedo tende a diminuir com o molhamento da superfície, e assim, resulta em maior  $R_n$  (LEITÃO; OLIVEIRA, 2000; SOUZA FILHO et al., 2006), uma vez que quando o solo encontra-se mais úmido apresenta coloração mais escura; enquanto que à medida que o solo perde água, sua coloração apresenta-se mais clara, e conseqüentemente maior o albedo (IDSO et al., 1975).

Considerando o tipo de cultura, as variações do albedo são decorrentes da arquitetura do dossel e densidade de plantas. Em floresta tropical no nordeste da Amazônia os valores variaram de aproximadamente 0,08 no período chuvoso e 0,11 no menos chuvoso (SOUZA FILHO et al., 2006); a partir de simulações de um modelo teórico, foi demonstrado que em floresta boreal o albedo está intimamente ligado à densidade das florestas, e que a introdução de determinadas espécies pode aumentar os valores (LUKES; STENBERG; RAUTIAINEN, 2013). Sabe-se que as práticas de manejo, como o preparo do solo também exercem influência sobre a radiação refletida, pois a depender do revolvimento do solo, a superfície pode apresentar-se mais ou menos rugosa, sendo que o aumento do albedo inversamente proporcional à rugosidade (OGUNTUNDE; AJAKI; GIESEN, 2006).

### 2.3 Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração da cultura (ET) é uma das variáveis de maior interesse para a agricultura, principalmente em regiões onde a água é fator limitante para a produção das culturas (JABLOUN; SAHLI, 2008). A sua correta determinação é essencial, sobretudo quando se almeja redução dos custos de produção, maior eficiência no uso da água e mitigação dos impactos ambientais, uma vez que os recursos hídricos são cada vez mais escassos (ALLEN et al., 2011; PAYERO; IRMAK, 2013).

A ET pode ser determinada a partir da estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e do coeficiente de cultura ( $K_c$ ), sendo o método de Penman-Monteith parametrizado no boletim número 56 da FAO (FAO56), o mais recomendado para estimativa da  $ET_0$ . O boletim FAO56 apresenta duas metodologias para determinação do  $K_c$ : i) A do  $K_c$  único, que engloba os efeitos da evaporação do solo e transpiração da cultura num único coeficiente; e ii) o  $K_c$  duplo, em que a transpiração e evaporação são determinados separadamente, pelo coeficiente basal ( $K_{cb}$ ) e de evaporação ( $K_e$ ), respectivamente (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2015). Entretanto, experimentos com trigo e milho no Norte da China demonstraram que as estimativas deste método apresentam subestimativa nas fases de desenvolvimento iniciais e superestimativa nas finais ao se utilizar a abordagem  $K_c$  duplo (LIU; LUO, 2010). Além do mais, Mendonça et al. (2007) em pesquisa com feijão na região de Campos dos Goytacazes-RJ relataram que os valores de  $K_c$  obtidos a partir de lisímetro na fase intermediária foram superiores aos ajustados pela abordagem do  $K_c$  único. Assim, torna-se necessário confrontar os resultados dos diversos métodos de estimativa de ET com métodos diretos e confiáveis.

A determinação de ET é realizada a partir de abordagens hídricas, micrometeorológicas e de fisiologia de plantas. A abordagem hídrica inclui o balanço de água no solo e medidas lisimétricas; a micrometeorológica engloba o balanço de energia baseado na razão de Bowen (BERB), o EC e o método aerodinâmico; por fim o fluxo de seiva e o sistema de câmaras se encaixam no grupo de fisiologia de plantas (RANA; KARTEJI, 2000). As técnicas supracitadas apresentam diversas aplicabilidades, peculiaridades e restrições, de modo que algumas permitem medidas apenas em determinadas escalas espaço-temporal; outras mensuram apenas a transpiração das plantas; e cada qual possui suas dificuldades e erros associados às medições, de modo que a utilização de qualquer técnica requer que seja obedecida uma série de premissas para que os resultados sejam válidos (WILSON et al., 2001). As técnicas micrometeorológicas são amplamente utilizadas, contudo, seu uso está restrito às pesquisas que visam validar modelos ou metodologias que apresentam utilização

mais simples e que melhor se adequam às condições climáticas de cada região (PAÇO et al., 2012; LIU et al., 2012; Er-RAKI, et al., 2013). A seguir serão descritas as técnicas micrometeorológicas BERB e EC por ser foco de estudo deste trabalho.

### 2.3.1 Método do Balanço de Energia - Razão de Bowen (BERB)

O conhecimento das trocas de calor e massa entre superfícies vegetadas e a atmosfera são essenciais para a compreensão da influência de fatores ambientais sobre o desenvolvimento das culturas. O balanço de energia em cultivos é composto basicamente por quatro componentes,  $R_n$ , fluxos de calor no solo ( $G$ ), latente ( $\lambda E$ ) e sensível ( $H$ ), sendo expresso pela seguinte equação (KUSTAS; STANNARD; JERRY ALLWINE, 1996):

$$R_n - \lambda E - H - G = 0 \quad (2)$$

Como discutido anteriormente, o componente  $R_n$  representa energia disponível no sistema;  $\lambda E$  é a energia utilizada no processo de evaporação da água ou transpiração, ou seja, representa a própria  $ET$ ; e por fim  $H$  é a energia utilizada no aquecimento do ar (KAR; KUMAR, 2010).  $R_n$  e  $G$  são obtidos através de sensores ou de modelos empíricos e  $\lambda E$  e  $H$  são os componentes de maior interesse em cultivos agrícolas, largamente estimados pelo método BERB.

A razão de Bowen ( $\beta$ ), definida como a razão entre  $H$  e  $\lambda E$ , foi proposta em 1926 para estimativa da evaporação a partir de um lago (BOWEN, 1926). Quando associada ao balanço de energia,  $\beta$  permite a determinação de  $H$  e  $\lambda E$  a partir de medidas de gradientes de temperatura do ar e pressão de vapor acima da superfície, sendo esse método denominado Balanço de energia – Razão de Bowen (BERB). Para determinação prática de  $\beta$ , é assumido igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta para vapor d'água ( $K_v$ ) e calor ( $K_h$ ). Entretanto, a igualdade  $K_v=K_h$  nem sempre ocorre quando se utiliza o BERB, principalmente sob condições de advecção (PEREZ; CASTELLVI; MARTÍNEZ-COB, 2008). Gavilán e Berengena (2007) avaliaram o desempenho do BERB sob advecção em condições de estabilidade e instabilidade atmosférica, e observaram superestimativa em ambas as condições, sobretudo em condição de inversão; ainda neste estudo observou-se  $K_h$  inferior a  $K_v$  na maior parte das observações e que a relação  $K_h/K_v$  seria inferior a 1 em condições de inversão de temperatura, sendo esta desigualdade uma das explicações para a tendência do BERB superestimar  $\lambda E$ .

A utilização prática e simples do BERB torna-o amplamente utilizado em diversos tipos de cultura agrícolas (cana-de-açúcar, milho, mangueiras), ecossistemas de cerrados e florestas (INMAN-BAMBER; McGLINCHEY, 2003; BORGES et al., 2008; GIAMBELLUCA et al., 2009a; GIAMBELLUCA et al., 2009b; ZHAO; LIU; ZHANG, 2010;). Contudo, a adoção do BERB para estimativa de H e  $\lambda E$  é sujeita a diversos problemas, que consequentemente fornecem dados inválidos. O primeiro problema está associado a erros nas medidas de  $R_n$ , G e dos gradientes de temperatura e umidade do ar; um outro problema é a ocorrência de condensação, que pode ser confundida com evaporação e induzir a sinais errados dos fluxos turbulentos, sendo bastante comum no início da manhã e final da tarde, como também durante eventos de precipitação; e por fim, um outro problema está associado à obtenção de uma grandeza imprecisa dos fluxos, mesmo que os sinais estejam exatos, comum quando os valores de  $\beta$  se aproximam de -1 (OHMURA et al., 1982).

Devido aos vários problemas inerentes ao BERB outras abordagens e modificações foram desenvolvidas. Liu e Foken (2001) sugerem determinar  $\lambda E$  a partir da combinação do BERB, para obtenção de  $\beta$  a partir dos gradientes verticais de temperatura e pressão de vapor, e de medidas de um anemômetro sônico para obtenção de H. Outra abordagem utilizada baseada no BERB é o sistema micro-razão de Bowen, que é uma forma reduzida do BERB para medir fluxos em “footprint” (área vista pelo instrumento) inferior ao convencional. Esta abordagem tem por objetivo a partição de  $\lambda E$  entre transpiração da cultura e evaporação do solo e tem demonstrado resultados aceitáveis quando comparados com medidas de lisímetro e EC, embora para condições de advecção, para as linhas entre as copas das culturas, que são sujeitas a sombreamento parcial, e sob condições desuniformes de umidade do solo, vários microssistemas são recomendados para que o método seja válido (ASHKTORAB et al., 1989; HOLLAND et al., 2013).

### **2.3.2 Método da correlação de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*)**

A correlação de vórtices turbulentos (EC) é um método micrometeorológico utilizado para determinação de fluxos de vapor d'água, calor e gases traços, como dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e metano ( $CH_4$ ), sobre diversas áreas, que incluem desde cultivos agrícolas e florestas, até oceanos e desertos (KONDO; TSUKAMOTO, 2007; ALBERTO et al., 2014).

Os princípios do método EC foram primeiramente descritos por Reynolds (1895). Em seguida, Swinbank (1951) apresentou um aparato para medição das flutuações verticais de

fluxos de calor e vapor d'água a partir de um anemômetro de fio quente. O método EC para a medição de fluxos de calor pode ser entendido da seguinte forma: se for considerado que a temperatura do ar que passa em determinado ponto é  $T$ , a densidade do ar  $\rho$ , a componente vertical da velocidade do vento para cima é  $w$  e o calor específico à pressão constante é  $C_p$ , então o calor é transferido para cima numa taxa  $C_p \rho w T$ . Agora, se for considerada a passagem de vários fluxos, em determinado espaço de tempo, com movimentos para cima e para baixo, a transferência de calor para cima é dada a uma taxa média  $N^{-1} \sum C_p \rho w T$  ou  $\sum C_p \rho \overline{wT}$ , sendo  $N$  o número de medições. Então, neste método as flutuações verticais do vento necessitam serem medidas muito rapidamente, visto que a atmosfera contém várias porções turbulentas de ar que se movem caoticamente carregando consigo vários constituintes. Então, o princípio básico de EC é determinar a covariância entre as flutuações verticais do vento e temperatura do ar, vapor d'água ou  $CO_2$ , e obter os fluxos calor sensível, latente ou de  $CO_2$ , pela diferença líquida de material que se move entre a cultura e atmosfera por meio da amostragem de fluxos turbulentos (BALDOCCHI, et al., 1988; BALDOCCHI, 2003).

Os fluxos turbulentos obtidos por EC possuem várias incertezas, resultantes de erros aleatórios, devido à natureza caótica da própria turbulência, ao sistema de instrumentos e mudanças no “*footprint*”; e de erros sistemáticos, que resultam de suposições não satisfeitas, dificuldades metodológicas, calibração do instrumento e além do próprio processamento de dados (MAUDER et al., 2013). A qualidade das medidas de fluxos turbulentos por esta técnica é geralmente avaliada a partir da relação entre os fluxos de saída ( $H+\lambda E$ ) e da energia disponível ( $R_n-G$ ), denominada grau de fechamento do balanço de energia (GFB). Este procedimento tem demonstrado haver subestimativa sistemática dos fluxos turbulentos, ou seja, a soma  $\lambda E+H$  é inferior a  $R_n-G$ , que induz à ocorrência de advecção, como demonstrado na Tabela 1 para várias culturas. Mesmo assim, considerando-se que é impossível alcançar GFB total a partir de dados experimentais (FOKEN et al., 2006), alguns autores recomendam determinadas artificações para contornar tais resultados.

O forçamento do balanço de energia é utilizado para alcançar completo GFB a partir de medidas de EC. Assim, tal procedimento pode ser realizado de duas formas, a primeira consiste em determinar a relação  $H/\lambda E$ , ou seja, o  $\beta$ , e recalcular ambos os fluxos com auxílio de medidas de  $R_n$  e  $G$  como utilizado no método BERB. Enquanto que a outra maneira de forçar o completo GFB é considerar as medidas de  $H$  juntamente com  $R_n$  e  $G$ , e obter  $\lambda E$  como resíduo da equação do balanço de energia (TWINE et al., 2000). Entretanto, apesar de vários autores realizarem o forçamento do fechamento do balanço de energia, vários autores

têm obtido resultados satisfatórios e utilizaram os dados propriamente medidos (CABRAL et al., 2012). Além das determinações de H e  $\lambda E$ , a técnica EC é amplamente utilizada para a obtenção de trocas de CO<sub>2</sub> em cultivos como será discutido a seguir.

**Tabela 1 - Valores do grau de fechamento do balanço de energia (GFB) pela técnica da correlação de vórtices turbulentos em diversas culturas.**

| Cultura  | GFB  | Autor                            |
|--|------|----------------------------------|
| Algodão<br>( <i>Gossypium hirsutum</i> L.)       | 0,76 | (CHÁVEZ; HOWELL; COPELAND, 2009) |
| Milho<br>( <i>Zea mays</i> L.)                   | 0,81 | (DING et al., 2010)              |
| Oliveira<br>( <i>Olea europaea</i> L.)           | 0,91 | (CAMMARLLERI et al., 2013)       |
| Batata-inglesa<br>( <i>Solanum tuberosum</i> L.) | 0,79 | (PARENT; ANCTIL (2012)           |

Fonte: Autor, 2015

## 2.4 Balanço de CO<sub>2</sub> em cultivos agrícolas

Atualmente, há um crescente interesse em compreender a influência de fatores ambientais sobre as trocas de CO<sub>2</sub> nos diversos ecossistemas terrestres (WAGLE; KAKANI, 2014). Várias redes micrometeorológicas de monitoramento de fluxos turbulentos (por exemplo: Fluxnet, ChinaFlux, Euroflux) tem analisado a variação de fluxos de CO<sub>2</sub> em diversas superfícies vegetais e localidades através da técnica de EC (BALDOCCHI et al., 2001; BERBIGIER; BONNEFOND; MELLMANN, 2001; HE et al., 2010).

Os fluxos de CO<sub>2</sub> pela técnica EC fornecem a troca líquida do ecossistema (NEE, *Net ecosystem exchange*), que representa a diferença entre a produção primária bruta (GPP – *Gross primary production*), equivalente à absorção bruta de CO<sub>2</sub> que é utilizada na fotossíntese, e a respiração do ecossistema (Re), representada pelas perdas de CO<sub>2</sub> a partir da planta, raízes e componentes do solo (SMITH et al., 2010). GPP não é facilmente medida, e é determinada pela soma entre NEE e Re diurna (Rd). As estimativas de Rd são realizadas através do ajuste de modelos empíricos da NEE noturna, que representa apenas respiração, em função da temperatura do ar ou do solo. Logo, os valores de Rd são estimados a partir dos coeficientes ajustados em função das temperaturas do ar ou do solo diurnas (SKINNER; ADLER, 2010; SUYKER; VERMA, 2004).

As variações dos componentes do balanço de CO<sub>2</sub> sobre culturas são dependentes de fatores fisiológicos, morfológicos e ambientais. Os fatores fisiológicos estão relacionados ao

tipo de metabolismo fotossintético, que inclui espécies  $C_3$  e  $C_4$ . No caso de  $C_3$ , sabe-se que estas culturas apresentam maior eficiência fotossintética em relação às  $C_4$  sob condições ideais de temperatura. Assim, Baldocchi (1994) confrontou resultados de assimilação de  $CO_2$  em milho ( $C_4$ ) e trigo ( $C_3$ ) em condições semelhantes, e observou que o dossel do trigo apresentou eficiência ligeiramente maior, além de acumulados diários de  $CO_2$  cerca de 41% superior, sendo tal comportamento atribuído, entre outros fatores, ao maior IAF do trigo que intercepta maior fração da radiação incidente. Entretanto, ao se confrontar milho e soja, observa-se que o milho se sobressai em relação à eficiência no uso da luz (SUYKER; VERMA, 2012).

A radiação solar é o principal fator que estimula as trocas gasosas entre as plantas e o ambiente, sendo que sua interceptação pelo dossel culturas é dependente do IAF. Deste modo, a captura de  $CO_2$  pelo dossel da cultura tende a aumentar à medida que o IAF aumenta, sendo os picos de assimilação observados quando IAF é máximo (SUYKER et al., 2005). Outro fator importantíssimo que controla a captura de  $CO_2$  é a disponibilidade hídrica, com redução à medida que o conteúdo de água no solo diminui (GUO et al., 2014; GRAÇA et al., 2010). Além disso, outros fatores como déficit de pressão de vapor d'água ar (DPV), e as condições fitossanitárias e nutricionais também podem exercer influência sobre a capacidade fotossintética dos vegetais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área experimental

O estudo foi conduzido em região de Tabuleiro Costeiro entre 07/06/2013 e 17/11/2013 numa área comercial de cana-de-açúcar de aproximadamente 17,1 ha, pertencente à Usina Santa Clotilde S.A, município de Rio Largo, estado de Alagoas, Brasil (9°28'04'' S; 35°47'34''W e 137 m de altitude). A área é circundada por diversas variedades de cana-de-açúcar com aproximadamente a mesma idade e práticas de manejo semelhantes (Figura 1). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso argissólico de textura média-argilosa e topografia plana. A umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e ponto de murcha são, respectivamente, 0,244 e 0,147 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; a densidade global é 1.500 kg m<sup>-3</sup> para o perfil de 0,6 m de profundidade. O clima da região conforme o método de Thornthwaite e Mather (1955) é classificado como úmido, megatérmico, com deficiência hídrica moderada no verão e grande excesso no inverno. O período chuvoso está compreendido entre março e agosto, no qual ocorrem 78% da precipitação média anual (1.818 mm) e o seco entre setembro e fevereiro. A temperatura do ar média é de 25,5°C e varia entre 19,4 e 31,8°C; a umidade relativa do ar média é de 70% (SOUZA; NICÁCIO; MOURA, 2005).

**Figura 1 - Mapa do estado de Alagoas e localização da área experimental em Rio Largo - AL.**



Fonte: Autor, 2015

O plantio da cana-açúcar, variedade RB867515, foi realizado em 25/03/2013 em espaçamento combinado (1,4 x 0,4 m). Antes do plantio, o preparo do solo consistiu de subsolagem e gradagem e a adubação utilizada foi 52 kg ha<sup>-1</sup> de N, 143 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 130 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

### 3.2 Medidas biométricas

O crescimento da cultura foi avaliado mensalmente através de medidas da altura do dossel (H<sub>c</sub>) e IAF a partir de dez plantas aleatórias. Para as estimativas diárias H<sub>c</sub> foi ajustado o modelo logístico em função de dias após o plantio - DAP (TEI; AIKMAN; SCAIFE, 1996):

$$H_c = \frac{H_f}{\left[ 1 + \left( \frac{H_f}{H_i} - 1 \right) \exp(-r \text{ DAP}) \right]} \quad (3)$$

em que: H<sub>i</sub> e H<sub>f</sub> (cm) são, respectivamente, as alturas no início e final do ciclo, r é a taxa de crescimento relativo máximo (cm cm<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>).

O IAF da cultura foi calculado pela razão entre a área foliar (HERMANN; CÂMARA, 1997) de todas as folhas (AF) e área de solo (S) ocupada por plantas (0,9 m):

$$IAF = \frac{(AF = C L 0,75 (N + 2) NP)}{S} \quad (4)$$

em que: AF é a foliar (m<sup>2</sup>); C e L são o comprimento e a largura da folha +3, respectivamente; 0,75 é o fator de forma; N é o número de folhas totalmente abertas e com pelo menos 20% de área verde; 2 é o fator de correção; e NP é o número de perfilhos por metro. O IAF diário foi obtido pelo ajuste do modelo log normal em função de DAP:

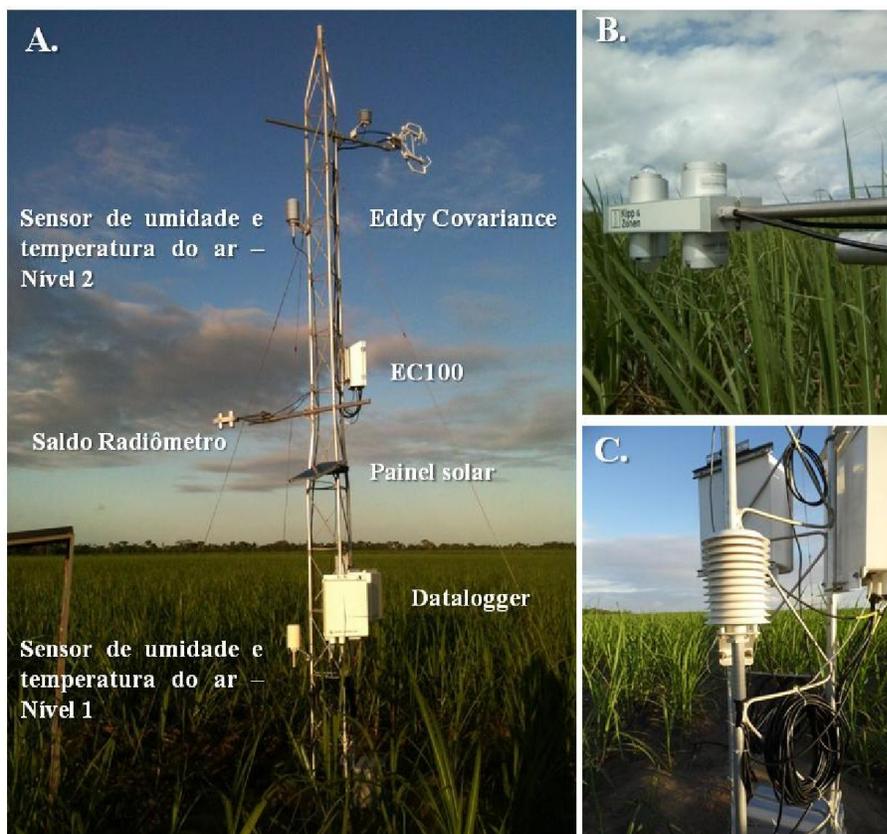
$$IAF = a \exp \left[ -0,5 \left( \ln \left( \left( \frac{DAP}{c} \right) / b \right) \right)^2 \right] \quad (5)$$

em que: a é o IAF máximo; b é o grau de decaimento do IAF; c é o valor de DAP no qual IAF é máximo.

### 3.3 Medidas radiométricas

As medidas de irradiância solar global ( $R_g$ ), refletida ( $R_r$ ), assim como a irradiância de ondas longas emitida pela superfície ( $R_s$ ) e atmosfera ( $R_a$ ) foram realizadas através de um saldo radiômetro (CNR1, Kipp & Zonen, Holanda) conectado a um sistema de aquisição de dados automático (CR3000, Cambell Scientific, Inc., Logan, USA) programado para armazenar medidas em médias de 5 min (Figura 2B). O BOC foi calculado pela diferença entre  $R_g$  e  $R_r$ , enquanto que o BOL pela diferença entre  $R_a$  e  $R_s$ . O  $R_n$  foi obtido pela diferença entre BOC e BOL e o albedo pela relação  $R_r/R_g$ . O índice de claridade ( $K_t$ ) foi calculado pela razão entre as irradiações solar global ( $H_g$ ) e no topo da atmosfera ( $H_o$ ) (ALLEN et al., 1998) e foi adotada a seguinte classificação:  $K_t \leq 0,3$  – céu nublado,  $0,3 < K_t < 0,7$  – parcialmente nublado e  $K_t \geq 0,7$  – sem nebulosidade (IQBAL, 1983).

**Figura 2 - Torre meteorológica (A), saldo radiômetro (B) e sensor de umidade e temperatura do ar (C) sobre o dossel da cana-de-açúcar.**



Fonte: Autor, 2015

A irradiância solar fotossintética incidente ( $R_f$ ) foi estimada como 44% de  $R_g$  (FERREIRA JUNIOR et al., 2012) e a transmitida ( $TR_f$ ) foi calculada com base na Lei de Beer (HIPPS; ASRAR; KANEMASU, 1983):

$$TR_f = R_f \exp^{(-k IAF)} \quad (6)$$

em que:  $K$  é coeficiente de extinção de luz para a cana-de-açúcar, adotado igual a 0,58 (INMAN-BAMBER, 1994). Assim, a irradiância solar fotossintética interceptada pelo dossel ( $IR_f$ ) foi calculada pela diferença entre a  $R_f$  e  $TR_f$ . E por fim, a fração de cobertura (%CS) do solo estimada como sendo igual à relação entre a irradiação solar interceptada ( $IH_f$ ) e incidente ( $H_f$ ) (ADAMS; ARKIN, 1977).

Todos os dados de irradiância foram transformados em médias de 30 min e a partir da integração dos valores instantâneos foram obtidos os valores diários (irradiações). A convenção utilizada considerou as irradiâncias em direção à superfície positivas, e negativas na direção oposta.

### 3.4 Medidas micrometeorológicas

#### 3.4.1 Método da correlação de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*)

O sistema de correlação de vórtices turbulentos (EC) foi instalado em uma torre micrometeorológica, a uma altura de 5,0 m na direção predominante do vento, considerando um “*fetch*” de 1:100 (BALDOCCHI et al., 2003) (Figura 2A). O EC é composto por um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3A 3D, Campbell Scientific, Inc., Logan, USA) que mede as flutuações verticais do vento e um analisador de gás infravermelho (EC150, Campbell Scientific, Inc., Logan, USA) que mensura as concentrações de vapor d’água e  $CO_2$  em frequência de 10 Hz (Figura 3). Os fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ) e sensível ( $H$ ) foram obtidos pela covariância entre as flutuações verticais do vento e a temperatura sônica e a concentração de vapor d’água, respectivamente, conforme as seguintes equações (BALDOCCHI et al., 2003; LI et al., 2008):

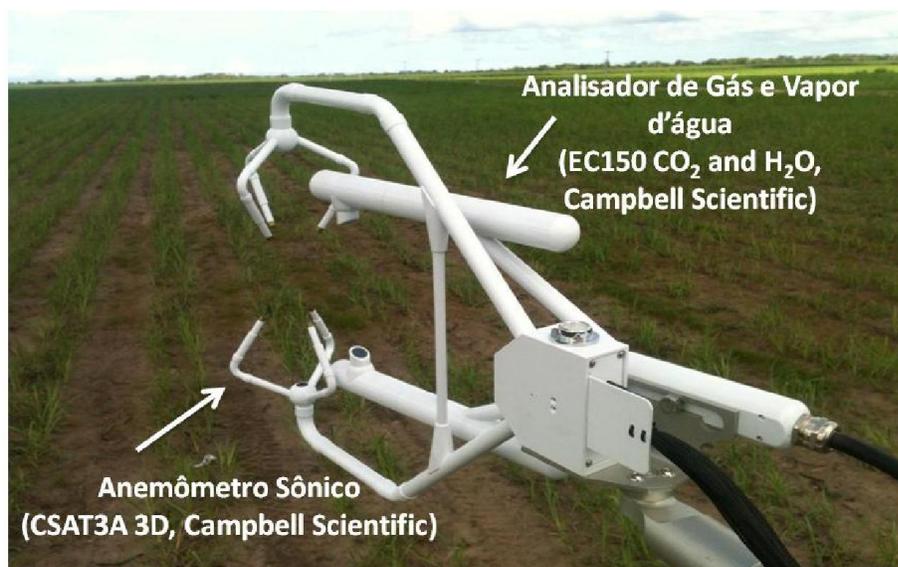
$$\lambda E = \rho a \lambda \overline{w' q'} \quad (7)$$

$$H = C_p \rho a \overline{w' T'} \quad (8)$$

em que:  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água ( $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$ );  $\rho_a$  é a densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $c_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $1.013,4 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );  $w'q'$  representam a covariância entre as flutuações verticais do vento ( $w'$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) e umidade do ar ( $q'$ ,  $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $w'T'$  é a covariância entre  $w'$  e a temperatura do ar ( $T$ ,  $^\circ\text{C}$ ). Após as determinações,  $\lambda E$  e  $NEE$  foram corrigidos para efeitos de densidade devido à transferência de calor e vapor d'água - WPL (WEBB; PEARMAN; LEUNING, 1988) e armazenadas em médias de 30 min por um sistema de aquisição de dados (CR3000, Campbell Scientific, Inc., Logan, USA).

As medidas dos fluxos turbulentos foram submetidas a um controle de qualidade que incluiu a exclusão de dados inconsistentes, durante eventos de chuva, mau funcionamento do equipamento e turbulência inadequada, ou seja, velocidade de fricção ( $u^*$ ) inferior a  $0,15 \text{ m s}^{-1}$  (ZHAO et al., 2007; HERNANDEZ-RAMIREZ et al., 2010; SCHMIDT et al., 2012). A qualidade das medidas de  $H$  e  $\lambda E$  pelo método de EC foram avaliadas pelo grau de fechamento do balanço de energia (GFB), através de regressão linear forçada a passar pela origem ( $Y = bX$ ) entre  $\lambda E + H$  ( $Y$ ) e a energia disponível,  $R_n - G$  ( $X$ ). A convenção utilizada para  $R_n$  foi positiva em direção à superfície e negativa na direção oposta; para  $\lambda E$  e  $H$  os sinais foram considerados positivos em direção à atmosfera e negativo no sentido contrário.

**Figura 3 - Equipamento de correlação de vórtices turbulentos sobre o cultivo de cana-de-açúcar.**



### 3.4.2 Balanço de energia - Razão de Bowen

Os fluxos  $\lambda E$  e  $H$ , além de determinados pela técnica EC, foram estimados pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen (BERB) (BOWEN, 1926; PEREZ et al. 1999). Para isso, dois sensores de umidade e temperatura do ar (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah) foram instalados em dois níveis, o primeiro a 0,25 m acima do dossel da cultura e o segundo a 3,20 m do primeiro (Figura 2A e 2C), sendo  $\beta$ , que representa a razão entre  $H$  e  $\lambda E$ , determinado pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} = \gamma \frac{t_1 - t_2}{ea_1 - ea_2} \quad (9)$$

em que:  $\Delta T$  e  $\Delta e$  representam, respectivamente, a diferença de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) e de pressão atual de vapor d'água do ar (kPa) entre os dois níveis de medição,  $t_1$  e  $t_2$  indicam a temperatura do ar nos níveis 1 e 2, respectivamente,  $\gamma = c_p P / \varepsilon \lambda$  é a constante psicrométrica,  $P$  é a pressão atmosférica (kPa),  $\varepsilon$  é a razão do peso molecular de vapor d'água/ar seco (0,622);  $ea_1$  e  $ea_2$  são as pressões de vapor atual nos níveis 1 e 2, respectivamente, obtidas pela seguinte equação:

$$ea = es \frac{UR}{100} \quad (10)$$

em que: UR (%) é a umidade relativa do ar em cada nível de medição;  $es$  é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa), expressa da seguinte forma:

$$es = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 T}{T + 237,3} \right] \quad (11)$$

em que:  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a temperatura do ar média medida em cada nível.

Os fluxos  $\lambda E$  e  $H$  pelo BERB foram calculados pelas seguintes equações:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (12)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (R_n - G) \quad (13)$$

em que:  $G$  é o fluxo de calor no solo, estimado como 1,4% de  $R_n$  a partir de estudos realizados com cana-de-açúcar na região (SANTOS, 2010). A análise de consistência dos dados fornecidos pelo BERB foi baseada em Unland et al. (1996), que recomenda exclusão de dados quando a diferença absoluta entre as pressões de vapor d'água do ar dos dois níveis de medição são inferiores a 0,005 kPa e valores de  $\beta$  próximo a -1, especificamente para o intervalo de  $|1+\beta| < 0,3$ .

O método BERB também foi utilizado considerando a temperatura da superfície (SBERB), conforme a seguir (PENMAN, 1948):

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} = \gamma \frac{t_0 - t_2}{e_{s_0} - e_{a_2}} \quad (14)$$

em que:  $t_0$  é a temperatura da superfície (°C), determinada a partir da seguinte equação:

$$t_0 = \sqrt[4]{\frac{E_0}{\epsilon_0 \sigma}} \quad (15)$$

em que:  $E_0$  é a emitância do dossel da cana-de-açúcar ( $W m^{-2}$ );  $\epsilon_0$  é a emissividade das folhas da cana-de-açúcar, 0,995 (IDSO et al., 1969);  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ).

### 3.4.3 Razão de Bowen modificado (MBERB)

Outro método utilizado para estimar  $\lambda E$  é o descrito por Liu e Foken (2001), que dispensa medidas de  $R_n$ . Este método que consiste na combinação de  $H$  determinado através de anemômetro sônico e dos gradientes verticais de temperatura e pressão de vapor como descrito no BERB, sendo  $\beta$  determinado pela Eq. 8 e  $\lambda E$  da seguinte forma:

$$\lambda E = \frac{H_{SA}}{\beta} \quad (16)$$

em que:  $H_{SA}$  é o fluxo de calor sensível determinado através de EC. Além disso,  $\lambda E$  foi estimado como resíduo da equação do balanço de energia (ECR) a partir dos dados  $R_n$  e  $G$ , e as medições  $H$  a partir da técnica EC.

### 3.4.4 Método FAO56 – Kc “dual”

A evapotranspiração (ET) dos diversos métodos foi obtida pela divisão de  $\lambda E$  pelo calor latente de vaporização da água ( $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$ ). Além destes métodos, a ET foi estimada pela abordagem do “K<sub>c</sub> dual” descrita no boletim FAO 56. Assim, a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foi estimada pelo modelo de Penman-Monteith parametrizado para uma cultura hipotética:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \left( \gamma \frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + [\gamma (1 + 0,34) u_2]} \quad (17)$$

em que:  $u_2$  é a velocidade do vento 2,0 m de altura, T é a temperatura do ar (°C) e  $\Delta$  é inclinação da curva de pressão de vapor saturado. A ET, denominada neste método de evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>), foi obtida pela seguinte equação:

$$ET_r = (K_e + K_s K_{cb}) ET_0 \quad (18)$$

em que:  $K_s$  é o coeficiente de estresse de água no solo (0-1);  $K_{cb}$  é o coeficiente de cultura basal e  $K_e$  o de evaporação do solo. Os valores de  $K_{cb}$  tabelados no boletim FAO 56 para a cana-de-açúcar são os seguintes: 0,15 (inicial), 1,20 (intermediário) e 0,70 (final). Os valores intermediário e final foram corrigidos em função da velocidade do vento, umidade relativa do ar e altura do dossel, conforme a seguinte equação:

$$K_{cb} = K_{cb(\text{Tab})} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(\text{RH}_{\min} - 45)] \left( \frac{H_c}{3} \right)^{0,3} \quad (19)$$

em que:  $K_{cb(\text{tab})}$  são os valores tabelados de  $K_{cb}$ ;  $\text{RH}_{\min}$  é a umidade relativa do ar mínima diária. Quando a camada superior do solo seca, menos água para evaporação está disponível, e redução na evaporação ocorre proporcionalmente à quantidade de água que permanece na camada superficial, estimada pela seguinte equação:

$$K_e = K_r (K_{c_{\max}} - K_{cb}) \leq \text{few } K_{c_{\max}} \quad (20)$$

em que:  $K_r$  é o coeficiente de redução da evaporação;  $f_{ew}$  é a fração de solo úmida exposta. O coeficiente de cultivo máximo ( $K_{c_{max}}$ ) foi calculado pela seguinte equação:

$$K_{c_{max}} = \max \left( \left\{ 1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left( \frac{H_c}{3} \right)^{0,3} \right\}, \{K_{cb} + 0,05\} \right) \quad (21)$$

Os demais procedimentos para determinação das demais variáveis estão presentes em Allen et al. (1998) e Lyra et al. (2007). O  $K_s$  diário foi obtido pela seguinte equação:

$$K_s = \frac{CAD - D_r}{(1 - p) CAD} \quad (22)$$

em que: CAD é a capacidade de água disponível (mm);  $D_r$  é depleção na zona radicular;  $p$  é o fator de depleção, considerado igual a 0,55. A CAD foi obtida utilizando a seguinte equação:

$$CAD = 1000 (\theta_{cc} - \theta_{pm}) Z_r \quad (23)$$

Os dados meteorológicos necessários para as estimativas da abordagem FAO56 “dual” foram obtidos na estação agrometeorológica do Centro de Ciência Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, que está situada nas proximidades do experimento.

### 3.5 Armazenamento de água no solo

A umidade volumétrica do solo foi medida através de sondas tipo de TDR (*Time Domain Reflectometry*) inseridas nas profundidades de 0,0-0,3 m e 0,3-0,6 m (Figura 4) e conectadas a um sistema automático de aquisição dados programado para armazenar medidas em médias de 5 min (CR3000, Cambell Scientific, Inc., Logan, USA). A informação do conteúdo de água foi obtida por uma sonda sensível à constante dielétrica do meio, composta de um dispositivo elétrico ligado por cabos a duas hastes de aço que transmitem uma onda. Assim, o período de saída da sonda varia como conteúdo de água no solo (SOUZA et al., 2006). A calibração das sondas foi realizada pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL):

$$\theta = -2,1641 + 0,16643P - 0,00284P^2 \quad (24)$$

em que:  $\theta$  é a umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $P$  é a leitura do período das sondas ( $\mu\text{s}$ ). O armazenamento na umidade ( $A_{UC}$ ) crítica foi obtido pela diferença entre a CAD e AFD.

**Figura 4 - Sensores de umidade do solo inseridos nas profundidades de 0,0-0,30 m e 0,30-0,60 m.**



Fonte: Autor, 2015

### 3.6 Análise estatística

As estimativas diárias pelos métodos BERB, SBERB, ECR, MBERB foram avaliadas confrontando-as com as medidas por EC e através da média aritmética. O desvio médio entre os dados foi mensurado pela raiz do quadrado médio do erro (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (25)$$

em que:  $P_i$  e  $O_i$  são os valores de  $\lambda E$  estimados e observados, respectivamente;  $n$  é o número de observações. O índice de concordância “d” foi calculado para quantificar a aproximação entre as estimativas dos diversos métodos e as determinações por EC (WILLMOTT, 1982). O “d” varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior aproximação entre os dados estimados e observados:

$$d = 1 - \frac{\sum_{n=1}^i (P_i - O_i)^2}{\sum_{n=1}^i \left[ \left( \left| P_i - \bar{O} \right| \right) + \left( \left| O_i - \bar{O} \right| \right) \right]^2} \quad (26)$$

em que:  $\bar{O}$  é a média dos valores observados. Além disso, a concordância das estimativas foi avaliada pela plotagem proposta por Bland e Altman (1986), em que os limites superiores (LSC) e inferiores de confiança (LIC) foram obtidos pelas diferenças entre as observações e estimativas  $\pm$  o produto de 1,96 pelo desvio padrão das diferenças.

### 3.7 Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE)

A NEE foi obtida pela covariância entre as flutuações verticais do vento e a concentração de CO<sub>2</sub> pela técnica de vórtices turbulentos. A resposta de NEE à IRf foi avaliada através do ajuste de uma função hiperbólica retangular (THORNLEY, 1976):

$$NEE = \left\{ \frac{(F_m - \alpha IRf)}{[F_m + (\alpha IRf)]} \right\} \quad (27)$$

em que:  $F_m$  é NEE máximo ( $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e  $\alpha$  é a eficiência quântica ( $\text{mg CO}_2 \text{ J}^{-1}$ ). Os dias cujas medidas não foram realizadas devido a problemas de medição foram estimados a partir da IRf e dos valores de  $\alpha$  e  $F_m$  ajustados (FALGE et al., 2001). A eficiência no uso da água [EUA,  $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$  de  $(\text{H}_2\text{O})$ ] foi calculada pela razão entre assimilação líquida de CO<sub>2</sub> e a perda de água da cultura (BALDOCCHI; VERMA; ROSENBERG, 1981a):

$$EUA = \frac{NEE}{ET} \quad (28)$$

### 3.8 Condutâncias

A condutância do dossel para vapor d'água ( $g_{cw}$ ,  $\text{mm s}^{-1}$ ) foi calculada a partir da seguinte equação (STEDUTO; HSIAO, 1998):

$$g_{cw} = \frac{\gamma \lambda E g_{aw}}{\Delta (-R_n - G) + \rho_a c_p g_{aw} DPV - \lambda E (s + \gamma)} \quad (29)$$

em que:  $\rho_a$  é a densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar ( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), DPV (es-ea) é o déficit de pressão de vapor. A condutância aerodinâmica ( $g_{aw}$ ) foi determinada pela seguinte fórmula (THOM, 1972; STEDUTO; HSIAO, 1998):

$$g_{aw} = \frac{u_z k^2}{\left[ \ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right) \right]^2 + (1,35u^{*1/3}) k \ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right)} \quad (30)$$

em que:  $z$  é a altura da medição da velocidade do vento (5,0 m),  $d_0$  é o deslocamento no plano zero (0,64Hc, m),  $z_0$  é comprimento de rugosidade (0,13Hc, m),  $u^*$  e  $u_z$  são a velocidade de fricção e do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), respectivamente, medidas pelo anemômetro sônico,  $k$  é a constante de von Karman (0,41), Hc é altura do dossel.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Condições ambientais e crescimento da cultura

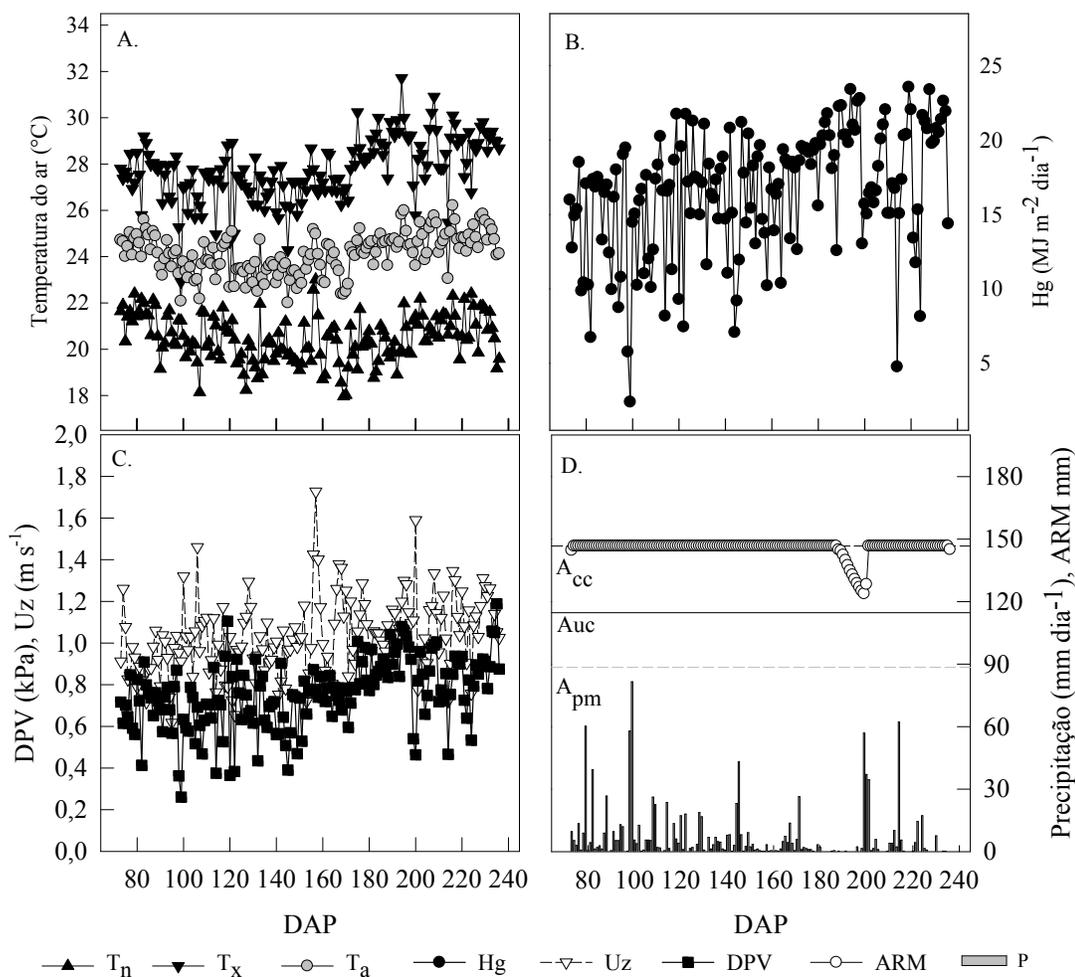
Durante o período avaliado a temperatura do ar média foi de 24,1°C com extremos diários de 18,0 e 31,7°C (Figura 5A). A irradiação solar global diária (Hg) média foi 16,5 MJ m<sup>-2</sup> e oscilou entre máximos e mínimos de 2,4 e 23,5 MJ m<sup>-2</sup> (Figura B). O DPV médio foi 0,76 kPa, com variação entre 0,26 e 1,19 kPa (Figura 5B); as velocidades do vento mínima e máxima a 2,0 m foram 0,62 e 1,73 m s<sup>-1</sup>, com média de 1,03 m s<sup>-1</sup> (Figura 5C). A precipitação pluvial foi de 576 mm, com valor máximo diário de 81,5 mm (99 DAP), e frequência média de um evento a cada 1,3 dias (Figura 5D). De acordo com a variação do ARM, a cultura não sofreu estresse hídrico no período analisado, visto que o mesmo manteve-se acima do limite do A<sub>uc</sub> (Figura 5D). Entre 187 e 200 DAP ocorreu diminuição do ARM devido a não ocorrência de chuvas ou a eventos abaixo de 2,0 mm dia<sup>-1</sup> (Figura 5D), período este que coincidiu com as maiores temperaturas observadas (Figura 5A).

A temperatura do ar exerce grande influência no crescimento da cana-de-açúcar e a ocorrência de temperaturas acima da faixa ideal causa redução no comprimento do colmo, não devido à redução do número de entrenós, mas sim pelo encurtamento dos mesmos; enquanto que valores subótimos acarretam diminuição tanto no número de entrenós quanto no seu tamanho (EBRAHIM et al. (1998). Períodos de estiagem entre setembro e outubro são comuns na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, visto que em estudos com cana-de-açúcar entre 2003 e 2008 na mesma região, apenas em 2003 esta característica não foi observada, enquanto que nos demais anos foi verificado déficit hídrico de até 50 mm (ALMEIDA et al., 2008; ABREU et al., 2013).

A avaliação dos padrões de crescimento da cultura demonstrou que no início das medições a altura do dossel foi de 103,9 cm (72 DAP) e no final foi 329,4 cm (305 DAP) (Figura 6A). Para o IAF, o valor foi 0,35 aos 72 DAP com aumento até o máximo de 3,5 (269 DAP); em seguida o IAF decaiu para 3,1 aos 305 DAP (Figura 6B). O modelo logístico ajustado à altura do dossel apresentou ajuste satisfatório com coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup><sub>adj</sub>) de 0,994 e coeficientes de ajuste significativos pelo teste t. O ajuste do modelo log normal ao IAF também foi satisfatório, com R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de 0,938 e coeficientes significativos pelo teste t (Tabela 2). As características de crescimento da variedade em estudo se mostraram semelhantes ao encontrado em outras pesquisas, em que altura do dossel e IAF máximos foram 304,0 cm e 3,5, respectivamente (OLIVEIRA et al., 2010; FERREIRA JUNIOR et al.,

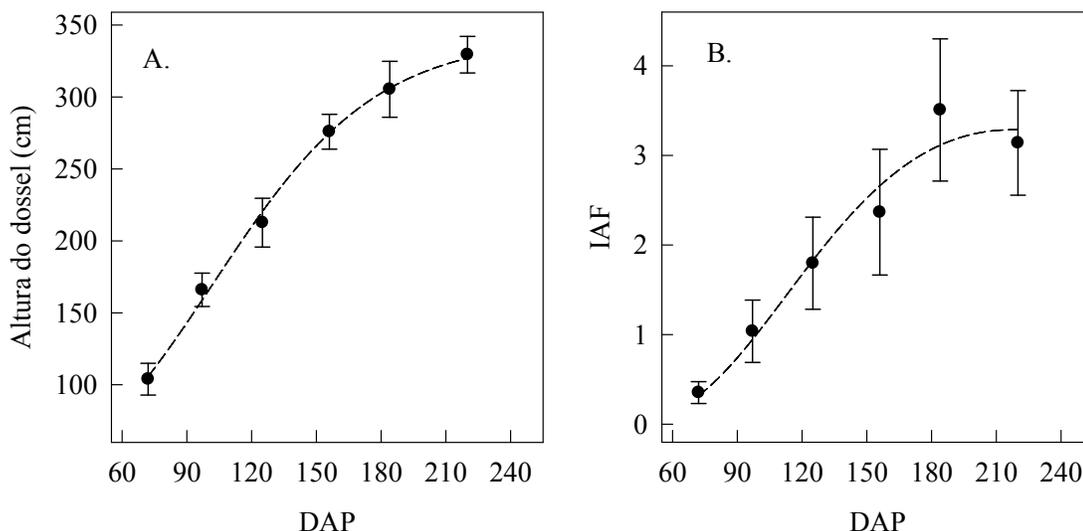
2012). Os elevados valores de  $R^2_{aju}$  reforçam a viabilidade de utilização destes modelos para a estimativa do crescimento da cana-de-açúcar e culturas semelhantes (BATISTA et al., 2013; LYRA et al, 2014).

**Figura 5 -** Variação diária da temperatura do ar mínima -  $T_n$ , máxima -  $T_x$  e média -  $T_a$  (A), irradiação solar global -  $H_g$  (B), déficit de pressão de vapor -  $DPV$  (C), velocidade do vento -  $u_z$  (C), armazenamento de água no solo -  $ARM$  e precipitação pluvial -  $P$  (D). Armazenamento de água no solo na capacidade de campo ( $A_{cc}$ ), umidade crítica ( $A_{uc}$ ) e ponto de murcha permanente ( $A_{pm}$ ).



Fonte: Autor, 2015

Figura 6 - Altura do dossel (A) e índice de área foliar (B) da cana-de-açúcar em função de dias após o plantio (DAP) na região de Rio Largo – AL. Barras verticais representam o desvio padrão.



Fonte: Autor, 2015

Tabela 2 - Coeficientes de ajuste ( $H_r$ ,  $H_i$ ,  $r$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) e de determinação ajustado ( $R^2_{aju}$ ) para o modelo logístico (altura do dossel) e log normal (IAF) em função de dias após o plantio.

|              |                         | Variável         |                        |
|--------------|-------------------------|------------------|------------------------|
|              |                         | Altura do Dossel | IAF                    |
| Coeficientes |                         |                  |                        |
| $H_r$        | 341,5** ( $\pm 14,0$ )  | $a$              | 3,29** ( $\pm 0,27$ )  |
| $H_i$        | 21,4* ( $\pm 3,8$ )     | $b$              | 0,51* ( $\pm 0,11$ )   |
| $r$          | 0,026** ( $\pm 0,002$ ) | $c$              | 217,6** ( $\pm 33,8$ ) |
| $R^2_{aju}$  | 0,99                    | $R^2_{aju}$      | 0,94                   |

Fonte: Autor, 2015

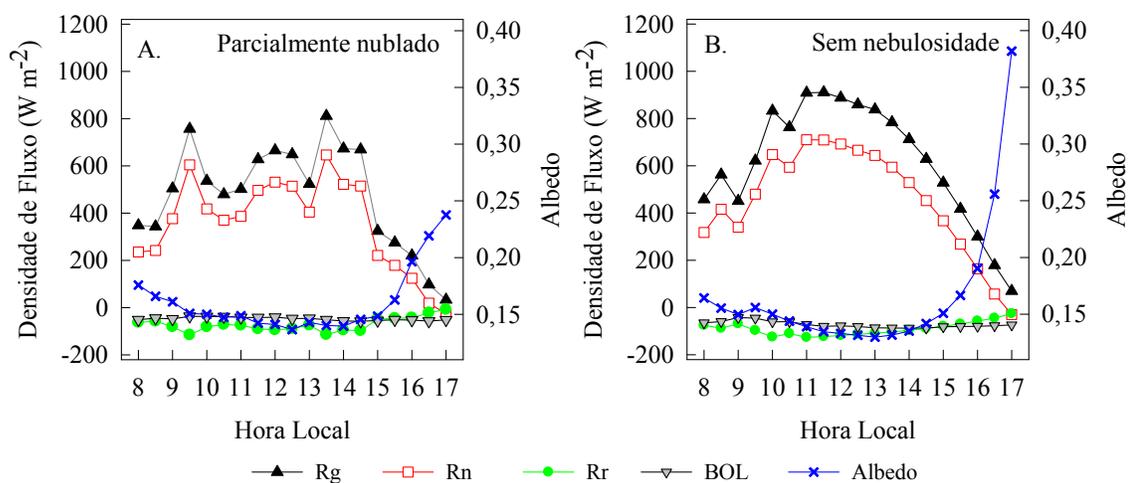
\*\*Significativo a  $p < 0,01$ ; \*Significativo a  $p < 0,05$  pelo teste t

## 4.2 Componentes do balanço de radiação

Ao longo do dia 20/07/2013 (116 DAP) a cultura apresentava IAF de 1,6 e as condições de nebulosidade indicaram céu parcialmente nublado ( $K_t = 0,6$ ). Devido à nebulosidade, os componentes do balanço de radiação demonstraram oscilações ao longo de todo o dia. Às 8:00 h,  $R_g$  foi  $348,5 \text{ W m}^{-2}$ , diminuiu para  $343,6 \text{ W m}^{-2}$  às 8:30 h e aumentou até às 9:30 h ( $756,4 \text{ W m}^{-2}$ ). No restante do dia, vários subperíodos de oscilação foram registrados, com máximo ( $811,3 \text{ W m}^{-2}$ ) às 13:30 h e tendência de diminuição ao entardecer. Diferentemente de  $R_g$ ,  $R_r$  foi máxima às 9:30 h ( $-115,3 \text{ W m}^{-2}$ ), enquanto que  $R_n$  às 13:30 h foi igual a  $646,3 \text{ W m}^{-2}$ . O BOL apresentou extremo de  $-57,2 \text{ W m}^{-2}$  às 14:30 h (Figura 7A). Os totais diurnos dos componentes  $R_g$ ,  $R_n$ ,  $R_r$  e BOL foram  $16,9$ ,  $12,7$ ,  $-2,6$  e  $-1,6 \text{ MJ m}^{-2}$ ,

respectivamente. Assim, Rn e BOL representaram 0,75, e 0,10 da Rg. Ainda neste dia, o albedo foi de 0,15 (Tabela 3) e foi maior nas primeiras e últimas horas do dia, menores próximos ao meio dia, devido ao menor ângulo de incidência dos raios solares, que permitem maior absorção da radiação solar pelo interior da vegetação (OGUNTUNDE; GEISEN, 2004; ANDRÉ et al., 2010). Na região do presente estudo, Santos (2009) avaliou o balanço de radiação em cana-de-açúcar em ciclo de cana-planta e durante a fase intermediária, que foi avaliada entre 03 e 27/06/2005, a relação Rn/Rg foi inferior ao deste estudo (0,68), com aumento à medida que IAF se elevou. Ainda conforme o autor, o albedo apresentou maior amplitude sob condição de céu claro, com média de 0,16, similar ao observado no presente estudo.

**Figura 7 - Irradiância solar global (Rg), saldo de radiação (Rn), irradiância solar refletida (Rr), balanço de ondas longas (BOL) e albedo para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).**



Fonte: Autor, 2015.

**Tabela 3 - Totais diários da irradiância solar global (Rg) e refletida (Rr), balanço de ondas longas (BOL), saldo de radiação (Rn) e albedo diário para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).**

| Componentes | Data                 |                  |
|-------------|----------------------|------------------|
|             | 20/07/2013           | 27/07/2013       |
|             | Parcialmente nublado | Sem nebulosidade |
| Rg          | 16,9                 | 21,7             |
| Rn          | 12,7                 | 15,9             |
| Rr          | -2,6                 | -3,2             |
| BOL         | -1,6                 | -2,6             |
| Albedo      | 0,15                 | 0,15             |
| Rn/Rg       | 0,75                 | 0,73             |
| BOL/Rg      | 0,10                 | 0,12             |

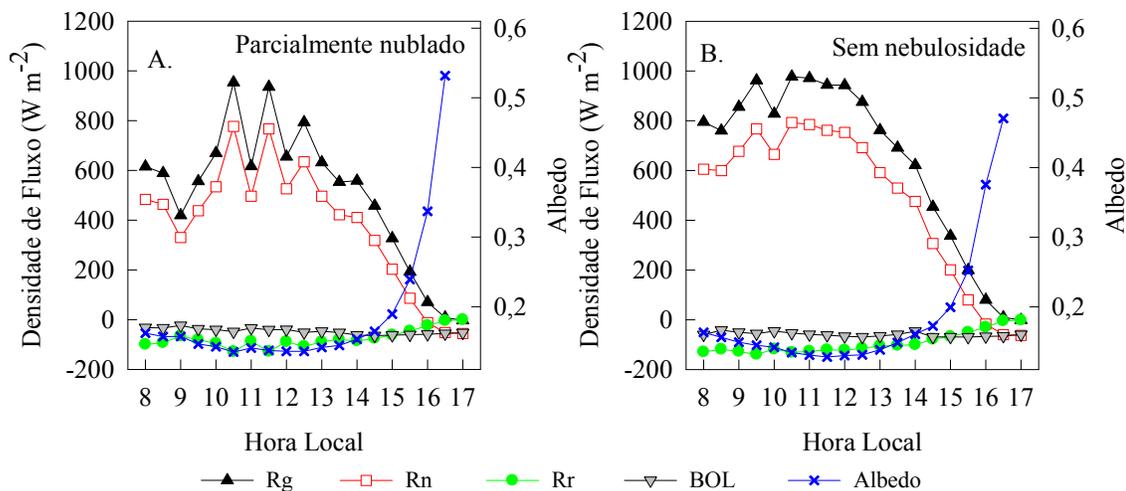
Fonte: Autor, 2015

Durante 27/07/2013 (123 DAP) o IAF da cultura foi de 1,8 ( $K_t = 0,7$ ) e o céu apresentou-se sem nebulosidade. A maior nebulosidade durante a manhã foi responsável pela maior oscilação dos componentes do balanço de radiação neste turno.  $R_g$ ,  $R_n$  e  $R_r$  seguiram a mesma tendência durante todo o dia, com oscilações entre às 8:00 e 11:30 h e diminuição no restante do dia.  $R_g$  foi  $457,4 \text{ W m}^{-2}$  às 8:00 h e  $562,5 \text{ W m}^{-2}$  às 8:30 h; logo após diminuiu para  $450,8 \text{ W m}^{-2}$  às 9:00 h e se elevou até o máximo às 11:00 h ( $910,0 \text{ W m}^{-2}$ ), com pequeno decréscimo às 10:30 h ( $763,0 \text{ W m}^{-2}$ ). Enquanto isso,  $R_n$  e  $R_r$  exibiram valores de pico às 11:00 h,  $710,0$  e  $-126,2 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente, e BOL às 14:00 h ( $-87,0 \text{ W m}^{-2}$ ) (Figura 7B). Os totais diurnos dos componentes foram de 21,7, 15,9, 3,2 e 2,6  $\text{MJ m}^{-2}$ , para  $R_g$ ,  $R_n$ ,  $R_r$  e BOL, respectivamente. Desta forma,  $R_n$  e BOL representaram 0,76 e 0,12 de  $R_g$  (Tabela 3). O albedo diário foi 0,15, com padrão análogo ao do dia 20/07/2013 (Figura 7B).

O segundo período de avaliação do balanço de radiação compreendeu os dias 18/10 e 31/10/2013. Durante 18/10/2013 (206 DAP) o  $K_t$  (0,5) indicou céu parcialmente nublado e a cultura apresentava IAF de 3,3. Os componentes oscilaram durante todo o dia.  $R_g$  foi  $615,2 \text{ W m}^{-2}$  às 8:00 h e decresceu até às 9:00 h ( $419,3 \text{ W m}^{-2}$ ); em seguida aumentou até o máximo às 10:30 h ( $953,8 \text{ W m}^{-2}$ ) e oscilou até às 12:30 h ( $793,6 \text{ W m}^{-2}$ ); a partir das 13:00 h ( $632,1 \text{ W m}^{-2}$ ) os valores decresceram conforme o final do período diurno. O curso diurno dos componentes  $R_n$  e  $R_r$  foram semelhantes a  $R_g$ , com máximos de  $777,0$  e  $-128,7 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente, também às 10:30 h.; diferentemente, BOL foi máximo às 14:30 h ( $-64,0 \text{ W m}^{-2}$ ) (Figura 8A). Neste dia,  $R_g$ ,  $R_n$ ,  $R_r$  e BOL totalizaram, respectivamente, 18,2, 13,8, -2,8 e -1,6  $\text{MJ m}^{-2}$ . Assim,  $R_n$  e BOL foram 0,76 e 0,09 de  $R_g$ , respectivamente (Tabela 4). O albedo médio foi de 0,15 com menores valores também próximos ao meio dia e maiores no início da manhã e final da tarde.

O  $K_t$  no dia 31/10/2013 (219 DAP) foi 0,7 (céu sem nebulosidade) e a cultura apresentava 3,3 de IAF. Os componentes do balanço de radiação aumentaram do início da manhã até próximo ao meio dia e diminuiu gradativamente ao entardecer. Às 8:00 h  $R_g$  foi  $795,3 \text{ W m}^{-2}$  e se elevou continuamente, com ligeiro decréscimo às 10:00 h ( $828,3 \text{ W m}^{-2}$ ), até o máximo às 11:00 h ( $977,3 \text{ W m}^{-2}$ ) juntamente com  $R_n$  ( $792,8 \text{ W m}^{-2}$ ), enquanto que  $R_r$  foi máxima às 9:30 h ( $-139,3 \text{ W m}^{-2}$ ) e BOL às 15:30 h ( $-69,2 \text{ W m}^{-2}$ ) (Figura 8B). Os componentes  $R_g$ ,  $R_n$ ,  $R_r$  e BOL totalizaram durante o dia, respectivamente, 23,5, 17,9, -3,5 e -2,1  $\text{MJ m}^{-2}$ . O albedo médio diário foi igual ao do dia anteriormente analisado (0,17), e, portanto, não sendo influenciado pelas condições de nebulosidade, como também observado por Souza, Escobedo e Tornero (1999) em feijão-vagem. As relações  $R_n/R_g$  e  $BOL/R_g$  foram análogas às observadas no dia 18/10/2013 (Tabela 4).

**Figura 8 - Irradiância solar global (Rg), saldo de radiação (Rn), irradiância solar refletida (Rr), balanço de ondas longas (BOL) e albedo para a cana-de-açúcar durante os dias 18/10 (parcialmente nublado) e 31/10/2013 (sem nebulosidade).**



Fonte: Autor, 2015

**Tabela 4 - Totais diários da irradiância solar global (Rg) e refletida (Rr), balanço de ondas longas (BOL), saldo de radiação (Rn) e albedo diário para a cana-de-açúcar durante os dias 18/10 (parcialmente nublado) e 31/10/2013 (sem nebulosidade).**

| Componentes | Data                 |                  |
|-------------|----------------------|------------------|
|             | 18/10/2013           | 31/10/2013       |
|             | Parcialmente nublado | Sem nebulosidade |
| Rg          | 18,2                 | 23,5             |
| Rn          | 13,8                 | 17,9             |
| Rr          | -2,8                 | -3,5             |
| BOL         | -1,6                 | -2,1             |
| Albedo      | 0,15                 | 0,15             |
| Rn/Rg       | 0,76                 | 0,76             |
| BOL/Rg      | 0,09                 | 0,09             |

Fonte: Autor, 2015

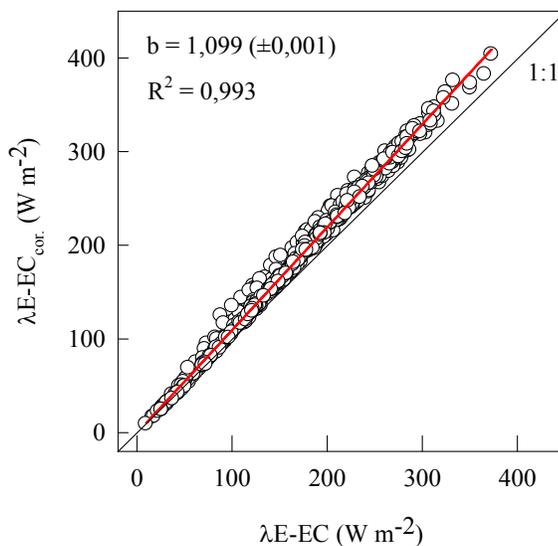
Durante o período analisado a relação Rn/Rg oscilou entre 0,72 e 0,83 e o albedo entre 0,13 e 0,19. Estes valores de Rn/Rg são superiores ao relatado por Silva et al. (2011), que em cultivo de cana-de-açúcar irrigado por sulcos no semiárido brasileiro obtiveram relação de 0,59; em relação ao albedo, valores entre 0,15 e 0,23 foram observados por estes autores; e valores diários ainda maiores, entre 0,24 e 0,31, são relatados por André et al. (2010); e entre 0,20 e 0,28 por Esteves et al. (2012), ambos na região do Norte Fluminense. Assim, como o albedo também é dependente de fatores biológicos, como a geometria e estrutura do dossel (MACHADO et al., 1985), que são inerentes de cada variedade, a ocorrência de menores valores de albedo, e, por conseguinte, maior relação Rn/Rg apresentadas neste estudo, seriam decorrentes do menor IAF (Figura 6B) em relação aos observados pelos autores referenciados

que foram superiores a 5,0. Além disso, como as medidas foram conduzidas durante o período chuvoso, a retenção de água pelo dossel da cana-de-açúcar pode ter contribuído para a menor reflexão da radiação. É importante destacar que a relação  $R_n/R_g$  é largamente variável de acordo com o tipo de cultura, haja vista que razão de 0,79 foi relatada em feijão-caupi (SOUSA LIMA et al., 2011); 0,80 em pastagem (BIUDES et al., 2009); e 0,64 em batata-doce (HELDWEIN et al., 2012).

### 4.3 Componentes do balanço de energia

Antes da análise dos padrões diurnos dos componentes do balanço de energia, os valores instantâneos de  $\lambda E$  foram corrigidos por WPL devido à transferência de calor e vapor d'água para atmosfera. A regressão linear forçada a passar pela origem demonstrou que os valores brutos de  $\lambda E$  são 9,9% menores que os valores corrigidos, sendo indispensáveis os procedimentos de correção WPL (Figura 9). Em estudo com pastagem na Alemanha, Liebenthal e Foken (2003) observaram que as correções WPL ampliam os valores de  $\lambda E$  entre 2 e 3%, e que correções positivas são necessárias durante o período diurno e negativas durante a noite.

**Figura 9 - Relação entre os fluxos de calor latente obtidos pela técnica de correlação de vórtices turbulentos ( $\lambda E-EC$ ) e corrigidos por WPL ( $\lambda E-EC_{cor.}$ ) para a cana-de-açúcar.**



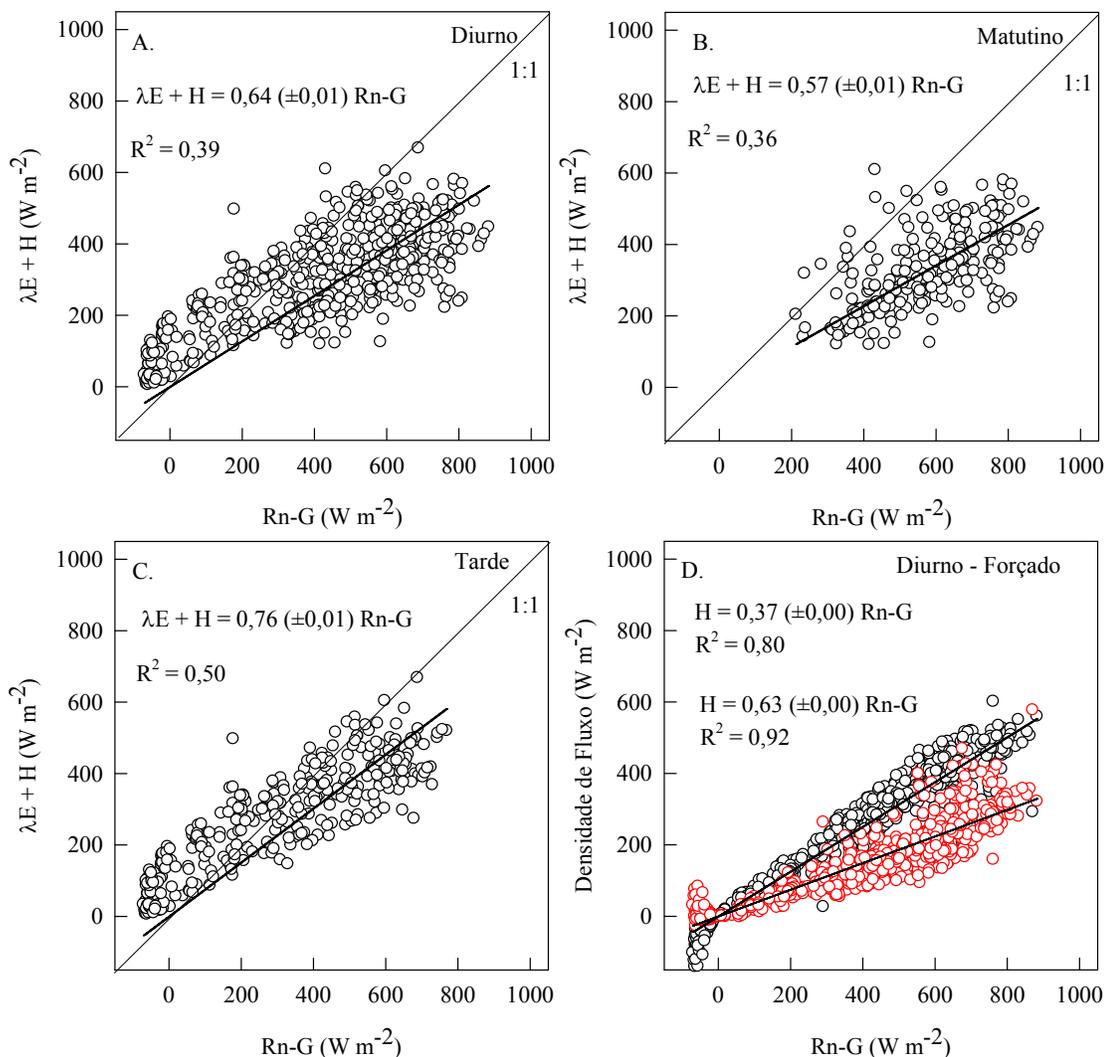
Fonte: Autor, 2015

O GFB foi avaliado em escala diurna e durante os turnos da manhã e tarde. Considerando os dados diurnos, observou-se GFB de 64% (Figura 10A); durante a manhã o índice foi menor, aproximadamente 57% (Figura 10B), e à tarde o valor foi superior (76%) (Figura 10C). Quando o fechamento do balanço de energia pela técnica EC não é satisfatório, dois artificios são recomendados para alcançar o fechamento do balanço de energia (TWINE et al., 2000; STEINWAND; HARRINGTON; OR, 2006; SÁNCHEZ et al., 2009). O primeiro consiste em considerar H como determinado corretamente e determinar  $\lambda E$  como resíduo da equação do balanço de energia, e o segundo, que foi adotado neste trabalho (baseado na razão de Bowen), propõe obter  $\beta$  pela relação entre  $\lambda E$  e H obtidos por EC, e recalcular ambos os fluxos através das equações 11 e 12, respectivamente.

Após o fechamento do balanço de energia pela razão de Bowen ( $\beta$ ), observou-se que 63% da energia disponível ( $R_n-G$ ) foi utilizada no processo de evapotranspiração ( $\lambda E$ ), enquanto que os 37% restantes foram empregados no aquecimento do ar (H) (Figura 10D). A utilização da maior parte de  $R_n-G$  por  $\lambda E$  é reflexo da disponibilidade hídrica no solo resultante dos vários eventos de precipitação durante a maior parte do período de medição, que não limitaram o processo de evapotranspiração. O forçamento do fechamento do balanço de energia quando se utiliza o método EC é comum, visto que é impossível alcançar GFB total a partir de dados experimentais (FOKEN et al., 2006). Várias são as causas que podem ser atribuídas à discrepância entre a energia disponível e  $\lambda E+H$ , como a ocorrência de advecção, perda de componentes de baixa frequência, limitações do próprio instrumento, retenção de calor na biomassa da cultura e a negligência de outros termos do balanço de energia (BARR et al., 1994; MEYERS; HOLLINGER, 2004; ONCLEY et al., 2007; LI et al., 2005).

O fechamento do balanço de energia é largamente avaliado quando se utiliza do método EC devido às subestimativas de  $\lambda E+H$  em relação  $R_n-G$ . Wilson et al. (2002) avaliaram o GFB a partir de vários sítios de medição (FluxNET) e alcançaram valor médio de 80%, com maior GFB também durante o período da tarde, sendo tal característica atribuída à subestimativa dos termos de armazenamento, que são maiores durante a manhã. Na pesquisa de Li et al. (2005), a partir dos dados de sítios da rede de pesquisa ChinaFLUX, encontraram GFB muito baixos durante o inverno, sendo uma das muitas causas para o baixo GFB do presente estudo.

**Figura 10 - Fechamento do balanço de energia considerando os fluxos diurnos totais (A), manhã (B), tarde (C) e após do forçamento do fechamento durante o cultivo da cana-de-açúcar.**



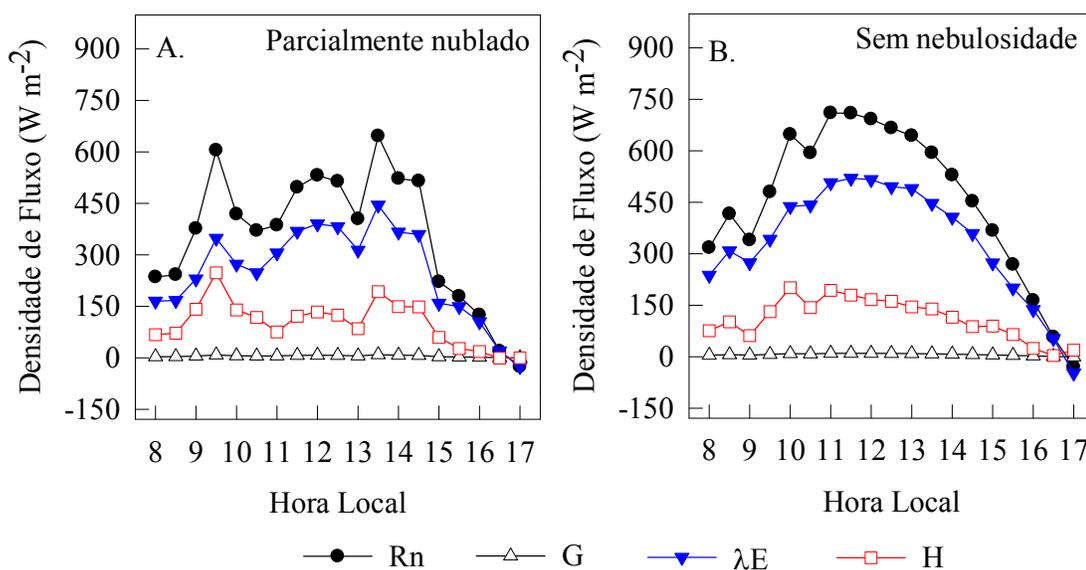
Fonte: Autor 2015

### 4.3.1 Balanço de energia versus nebulosidade

A avaliação dos componentes do balanço do balanço de energia permite quantificar a partição da energia disponível entre os processos de aquecimento do ar ( $H$ ) e evapotranspiração ( $\lambda E$ ). Ao longo de 20/07/2013, que se caracterizou como parcialmente nublado ( $Kt = 0,57$ ), os fluxos oscilaram durante todo o dia devido à maior presença de nuvens.  $\lambda E$  aumentou entre 8:00 h ( $165,0 W m^{-2}$ ) e 9:30 h ( $348,2 W m^{-2}$ ) e decaiu até às 10:30 h ( $247,6 W m^{-2}$ ). A partir de 11:00 h ( $305,6 W m^{-2}$ ),  $\lambda E$  se elevou com ligeiro decréscimo às

13:00 h ( $313,7 \text{ W m}^{-2}$ ) até atingir o pico ( $447,7 \text{ W m}^{-2}$ ) juntamente com Rn ( $646,3 \text{ W m}^{-2}$ ) às 13:30 h; logo após ocorreu tendência de diminuição ao entardecer. O padrão diurno de H apresentou-se similar aos demais fluxos, com aumento entre 8:00 h ( $67,2 \text{ W m}^{-2}$ ) e 9:30 h ( $247,8 \text{ W m}^{-2}$ ), quando foi máximo. Em seguida, H oscilou até às 13:30 h ( $84,9 \text{ W m}^{-2}$ ) e decaiu ao entardecer (Figura 11A). Os fluxos  $\lambda E$ , H e Rn somaram neste dia 9,0, 3,6 e  $12,7 \text{ MJ m}^{-2}$ , respectivamente, sendo assim, as relações  $\lambda E/Rn$ ,  $H/Rn$  e  $\beta$  médio foram, 0,71, 0,28 e 0,40, respectivamente (Tabela 5).

**Figura 11 - Variação diurna do saldo de radiação (Rn), fluxos de calor no solo (G), latente ( $\lambda E$ ) e sensível (H) para a cana-de-açúcar e durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).**



Fonte: Autor, 2015

A variação diurna dos componentes do balanço de energia durante 27/07/2013, classificado sem nebulosidade ( $Kt = 0,71$ ), apresentou oscilação durante a manhã e decaimento gradativo ao entardecer. Às 8:00 h,  $\lambda E$  foi  $237,4 \text{ W m}^{-2}$ , aumentou para  $308,4 \text{ W m}^{-2}$  às 8:30 h, decaiu para  $273,7 \text{ W m}^{-2}$  às 9:00 h e aumentou até o pico às 11:30 h ( $519,9 \text{ W m}^{-2}$ ). Em seguida,  $\lambda E$  decaiu até apresentar-se negativa às 17:00 h. Em relação a H, este foi  $75,7 \text{ W m}^{-2}$  às 8:00 h, se elevou para  $101,7 \text{ W m}^{-2}$  às 8:30 h, e decaiu para  $61,4 \text{ W m}^{-2}$  às 9:00 h, e aumentou até o máximo às 10:00 h ( $201,0 \text{ W m}^{-2}$ ). No restante do dia, oscilações ainda foram observadas entre 10:30 e 11:00 h, e a partir das 12:00 h, H decaiu gradativamente ao entardecer como os demais fluxos (Figura 11B). Os totais diurnos de  $\lambda E$  e H neste dia foram  $12,1$  e  $3,6 \text{ MJ m}^{-2}$ , e tendo em vista que o Rn totalizou  $15,9 \text{ MJ m}^{-2}$ , as relações  $\lambda E/Rn$  e  $H/Rn$

foram, respectivamente, 0,76 e 0,23. O  $\beta$  médio ao longo do dia em questão foi de 0,30 (Tabela 5). Desta forma, comparando-se os dois dias avaliados em função das condições de nebulosidade, pode-se observar que as relações  $\lambda E/R_n$  e  $H/R_n$  apresentaram-se diferentes, sendo a maior parte de  $R_n$  destinada a  $\lambda E$  em céu claro.

**Tabela 5 - Totais diários dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), sensível (H) e saldo de radiação ( $R_n$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).**

| Componentes     | Data                 |                  |
|-----------------|----------------------|------------------|
|                 | 20/07/2013           | 27/07/2013       |
|                 | Parcialmente nublado | Sem nebulosidade |
| $R_n$           | 12,7                 | 15,9             |
| $\lambda E$     | 9,0                  | 12,1             |
| H               | 3,6                  | 3,6              |
| $\beta$         | 0,40                 | 0,30             |
| $\lambda E/R_n$ | 0,71                 | 0,76             |
| $H/R_n$         | 0,28                 | 0,23             |

Fonte: Autor, 2015

Comparando-se os padrões dos componentes do balanço de energia nos dias anteriormente discutidos, observou-se que a partição de  $R_n$  entre  $\lambda E$  e H apresentou-se distinta de acordo com as condições de nebulosidade, com maior relação  $\lambda E/R_n$  em condições de céu claro; enquanto isso H apresentou comportamento inverso, com maior relação  $H/R_n$  em céu parcialmente nublado (Tabela 5).

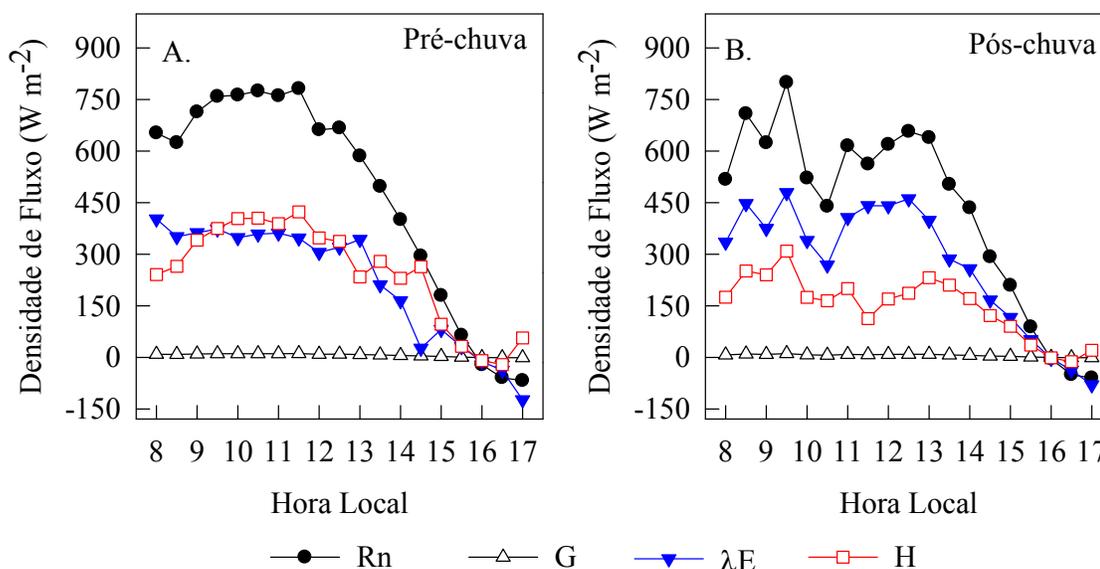
#### 4.3.2 Balanço de energia versus disponibilidade hídrica

A análise dos padrões dos fluxos de energia em função da disponibilidade hídrica foi representada pelos dias 06/10 e 20/10/2013. Durante 06/10/2013 as condições de nebulosidade indicaram céu sem nebulosidade ( $K_t = 0,7$ ) e nos 13 dias antecedentes foram registrados apenas dois eventos de precipitação inferiores a 1,0 mm, que causaram redução do ARM para 132,9 mm (194 DAP), Figura 5D. Neste dia,  $R_n$  demonstrou pequenas oscilações no período da manhã com máximo às 11:30 h (781,2  $W m^{-2}$ ). Às 8:00 h,  $\lambda E$  foi máximo com 402,4  $W m^{-2}$ , decaiu para 350,8  $W m^{-2}$  às 8:30 h, permaneceu praticamente constante até às 11:30 h (347,1  $W m^{-2}$ ) e diminuiu para 305,0  $W m^{-2}$  às 12:00 h; em seguida os valores diminuíram ao entardecer. O aspecto diurno de H foi crescente entre 8:00 h (241,0  $W m^{-2}$ ) e o máximo às 11:30 h (423,2  $W m^{-2}$ ). Após, houve diminuição com ligeiras oscilações às 13:30 h (279,1  $W m^{-2}$ ) e 14:30 h (263,6  $W m^{-2}$ ) e diminuição ao entardecer (Figura 12A). Neste dia, os

acumulados de  $R_n$ ,  $\lambda E$  e  $H$  foram, respectivamente, 17,5, 8,6 e 8,7 MJ m<sup>-2</sup>, que indicam  $\lambda E/R_n$  e  $H/R_n$  e  $\beta$  médio de 0,49 e 0,50 e 0,99, respectivamente (Tabela 6). A partição dos fluxos indicou que  $R_n$  foi consumido aproximadamente igual entre  $H$  e  $\lambda E$ .

Em relação ao dia 20/10/2013, classificado como parcialmente nublado ( $K_t = 0,6$ ), pôde-se observar elevação do ARM até o Acc, em função da ocorrência de 141,3 mm de chuva nos dias antecedentes (Figura 5D). O  $R_n$  oscilou ao longo de todo o dia, com maiores valores no período da manhã. Às 8:00 h  $R_n$  foi 517,2 W m<sup>-2</sup> e atingiu o máximo às 9:30 h (799,2 W m<sup>-2</sup>). Em seguida verificou-se decréscimo até às 10:30 h (439,1 W m<sup>-2</sup>), oscilação até às 13:00 h (639,1 W m<sup>-2</sup>) e diminuição até o final da tarde.  $\lambda E$  foi 335,0 W m<sup>-2</sup> às 8:00 h e seguiu o mesmo curso diário de  $R_n$ , com máximo também às 9:30 h (478,8 W m<sup>-2</sup>). De forma análoga,  $H$  apresentou várias oscilações ao longo do dia e maiores valores durante a manhã, entretanto com máximo às 11,5 h (423,2 W m<sup>-2</sup>) (Figura 12B). Os totais diários de  $R_n$ ,  $\lambda E$ ,  $H$  e o  $\beta$  médio foram, respectivamente, 16,0, 10,2, 5,5 e 0,55 (Tabela 6). Assim, as relações  $\lambda E/R_n$  e  $H/R_n$  e  $\beta$  médio foram, respectivamente, 0,64, 0,34 e 0,55. Diferente do dia anteriormente discutido (06/10/2013), cujo ARM encontrava-se próximo à  $A_{uc}$ , devido a falta de chuvas, a maior porção de  $R_n$  foi consumida por  $\lambda E$  durante 20/10/2013.

**Figura 12 - Variação diurna do saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxos de calor no solo ( $G$ ), latente ( $\lambda E$ ) e sensível ( $H$ ) para a cana-de-açúcar e durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva).**



Fonte: Autor, 2015

**Tabela 6 - Totais diários dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), sensível (H) e saldo de radiação (Rn) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva).**

| Componentes    | Data       |            |
|----------------|------------|------------|
|                | 06/10/2013 | 20/10/2013 |
|                | Pré-chuva  | Pós-chuva  |
| Rn             | 17,5       | 16,0       |
| $\lambda E$    | 8,6        | 10,2       |
| H              | 8,7        | 5,5        |
| $\beta$        | 1,01       | 0,54       |
| $\lambda E/Rn$ | 0,49       | 0,64       |
| H/Rn           | 0,50       | 0,35       |

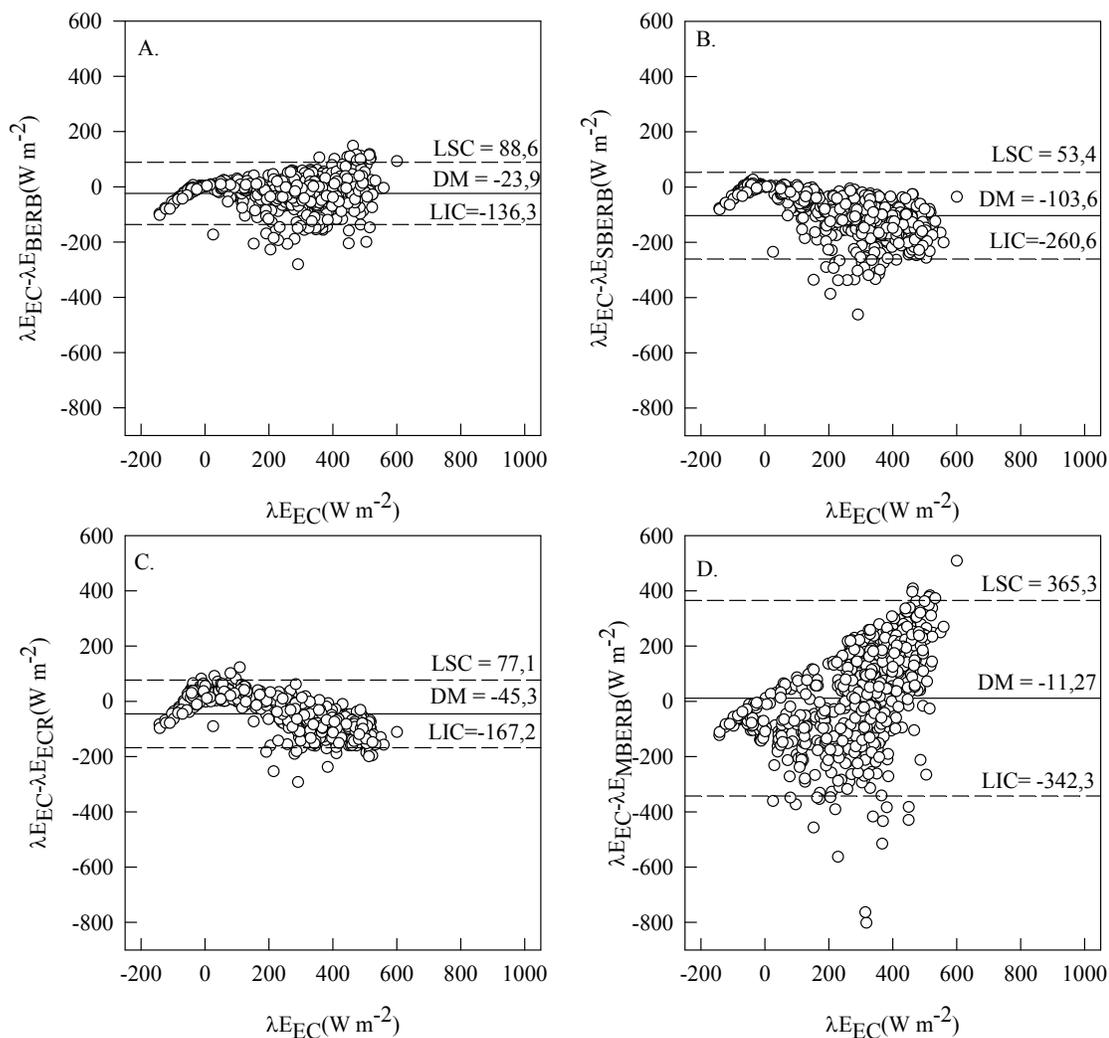
Fonte: Autor, 2015

As relações  $\lambda E/Rn$ , H/Rn e  $\beta$  foram fortemente influenciadas pela disponibilidade de água, com maior relação H/Rn e  $\beta$  superior a 1,0 no dia caracterizado como pré-chuva. O valor de  $\beta$  tem relação com a disponibilidade hídrica e valores superiores a 1,0 foram observados para a cana-de-açúcar em Sertãozinho-SP, sendo que após a ocorrência de precipitações os valores passaram a ser inferiores a 0,5 (CABRAL et al., 2003).

#### 4.3.3 Comparação dos métodos de estimativa de $\lambda E$

A partir da análise de consistência das estimativas do BERB, observou-se que 99% das medidas diurnas foram consideradas válidas. Os métodos de estimativa de  $\lambda E$  foram avaliados considerando as determinações do método EC como referência. A partir da análise de concordância de Bland e Altman (1981) observou-se que as diferenças entre as estimativas dos diversos métodos e as determinações do EC apresentaram tendência relativamente linear quando os valores estiveram entre -100 e 0 W m<sup>-2</sup> (Figura 13). Após este intervalo, as estimativas dos métodos apresentaram aspectos distintos. O BERB (Figura 13A) não demonstrou tendência definida, enquanto que as diferenças associadas ao SBERB (Figura 13B) e ECR (Figura 13C) aumentaram negativamente, o que indicou superestimativa em relação às observações. As estimativas do MBERB apresentaram tendência contrária em relação aos outros métodos, com tendência positiva dos erros, que indicou a subestimativa das observações (Figura 13D). Apesar disso, no geral a maioria das estimativas de  $\lambda E$  pelas diversas abordagens se mostraram no intervalo de aceitação, que compreende LSC e LIC.

**Figura 13 -** Plotagem de Bland e Altman para os limites de concordância entre os valores de fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) determinados pelo método da correlação de vórtices turbulentos (EC) e estimados pela razão de Bowen (BERB), razão de Bowen com temperatura da superfície (SBERB), correlação de vórtices turbulentos residual (ECR) e razão de Bowen modificado (MBERB). Limite superior (LSC) e inferior de confiança (LIC) e desvio médio (DM).

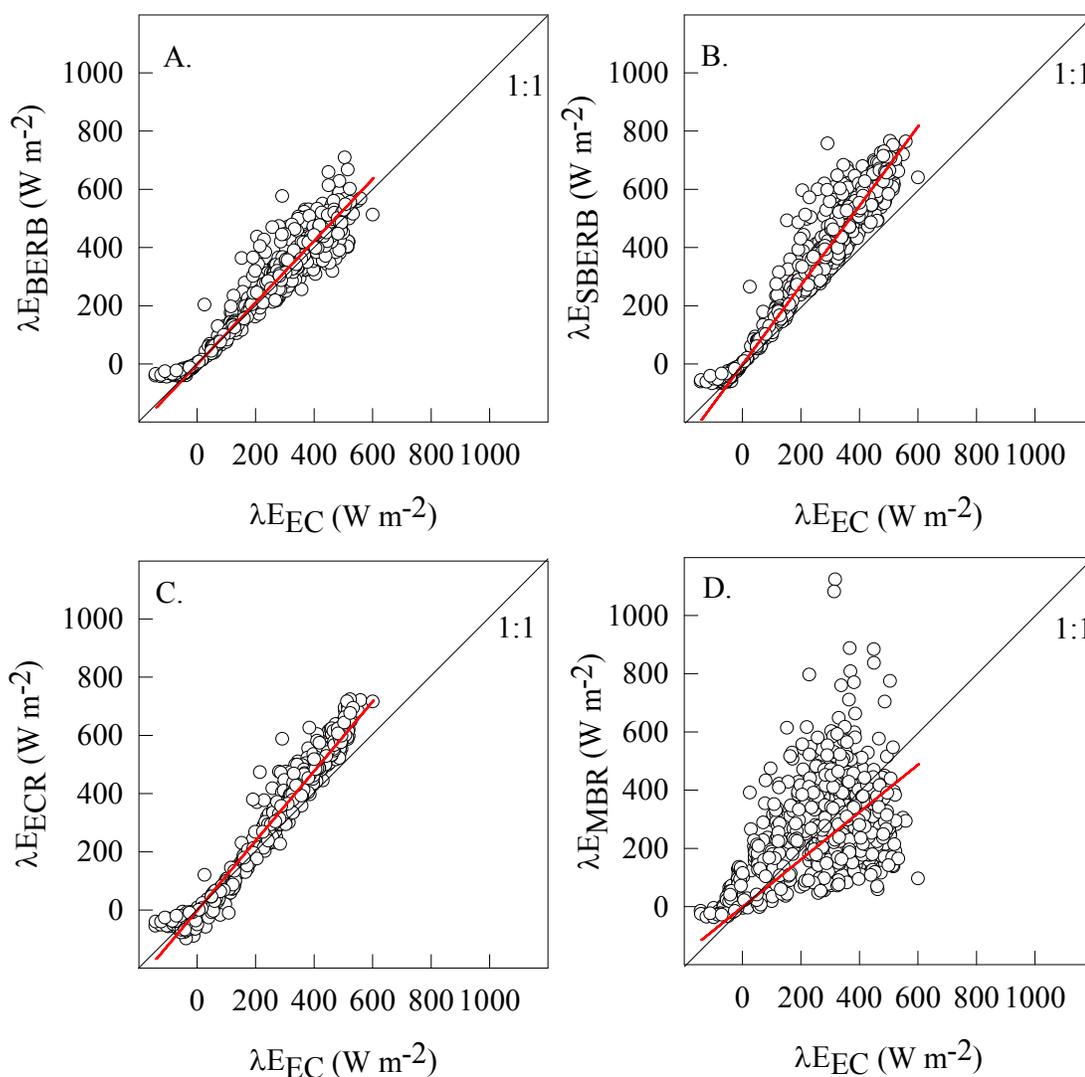


Fonte: Autor, 2015

As comparações dos valores instantâneos de  $\lambda E$  obtidos por EC e estimados pelos demais métodos micrometeorológicos são apresentadas na Figura 14. A partir dos índices estatísticos empregados pôde-se observar que o BERB e ECR apresentaram os menores RMSE 61,1 e 77,1 W m<sup>-2</sup>, respectivamente. Enquanto isso, SBERB e MBERB exibiram os maiores RMSE, 130,9 e 180,8 W m<sup>-2</sup>, respectivamente. Em termos de concordância, “d” seguiu a mesma sequência de desempenho do RMSE, com maior índice para o BERB (0,97), seguido do ECR (0,96), que foi próximo ao SBERB (0,90). O MBERB apresentou o menor

“d” (0,69), Tabela 7. No geral, de acordo com o coeficiente angular da reta (b), a tendência do método BERB foi de superestimar  $\lambda E$  determinada por EC em aproximadamente 6%. Os métodos ECR e SBERB também apresentaram tendência de superestimativa, 20 e 36%, respectivamente, enquanto que o MBERB mostrou tendência de subestimativa de cerca de 19% em relação a EC (Tabela 7).

**Figura 14 - Comparação dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ) determinado pelo método da correlação de vórtices turbulentos (EC), razão de Bowen (BERB), razão de Bowen com temperatura da superfície (SBERB), correlação de vórtices turbulentos residual (ECR) e razão de Bowen modificado (MBERB).**



Fonte: Autor, 2015

**Tabela 7 – Raiz do quadrado médio do erro (RMSE), coeficiente angular da reta (b) e índice de concordância (d) entre os fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ) pelo método da correlação de vórtices turbulentos e razão de Bowen (BERB), razão de Bowen com temperatura da superfície (SBERB), vórtices turbulentos residual (ECR) e razão de Bowen modificado (MBERB).**

| Método | RMSE  | Índice |      |
|--------|-------|--------|------|
|        |       | b      | d    |
| BERB   | 62,1  | 1,06   | 0,97 |
| SBERB  | 130,9 | 1,36   | 0,90 |
| ECR    | 77,1  | 1,20   | 0,96 |
| MBERB  | 180,8 | 0,81   | 0,69 |

Fonte: Autor, 2015.

A ET foi avaliada a partir dos valores acumulados durante os dias em que as determinações do EC foram válidas, sendo inseridos para efeito de comparação às estimativas do método FAO56 “dual”. A ET total por EC foi de 122,5 mm, com média de 4,0 mm dia<sup>-1</sup>, que resultou em relação ET/ET<sub>0</sub> de 0,89, próximo às estimativas do BERB, que apresentou acumulado de 131,5 mm, média de 4,2 mm dia<sup>-1</sup> e ET/ET<sub>0</sub> de 0,96. Os menores acúmulos de ET foram as estimados pelo MBERB (110,5 mm) e FAO56 (105,5 mm), com médias de 3,6 e 3,4 mm dia<sup>-1</sup> e ET/ET<sub>0</sub> de 0,80 e 0,77, respectivamente (Tabela 8). Os baixos valores de ETr e ET/ET<sub>0</sub> estimados pelo método FAO56 dual são resultantes da alta influência da umidade do solo sobre a ET, visto que o K<sub>cb</sub> é penalizado pelo K<sub>s</sub> à medida que a disponibilidade de água no solo diminui (LYRA et al., 2007), como observado entre 187 DAP e 200 DAP, quando o ARM apresentou diminuição até próximo ao A<sub>uc</sub> e os valores de ET diminuíram até 0,1 mm dia<sup>-1</sup>.

**Tabela 8 – Evapotranspiração acumulada (ET acumulada), média (ET média) e relação entre evapotranspiração da cana-de-açúcar e de referência (ET/ET<sub>0</sub>) durante os dias avaliados pelo método da correlação de vórtices turbulentos e estimados pela razão de Bowen (BERB), razão de Bowen com temperatura da superfície (SBERB), correlação de vórtices turbulentos residual (ECR), razão de Bowen modificado e FAO56 em cultivo de cana-de-açúcar.**

| Método | ET acumulada | ET média             | ET/ET <sub>0</sub> |
|--------|--------------|----------------------|--------------------|
|        | mm           | mm dia <sup>-1</sup> | ...                |
| EC     | 122,5        | 4,0                  | 0,89               |
| BERB   | 131,4        | 4,2                  | 0,96               |
| SBERB  | 167,6        | 5,4                  | 1,22               |
| ECR    | 143,3        | 4,6                  | 1,04               |
| MBERB  | 110,5        | 3,6                  | 0,80               |
| FAO56  | 105,5        | 3,4                  | 0,77               |

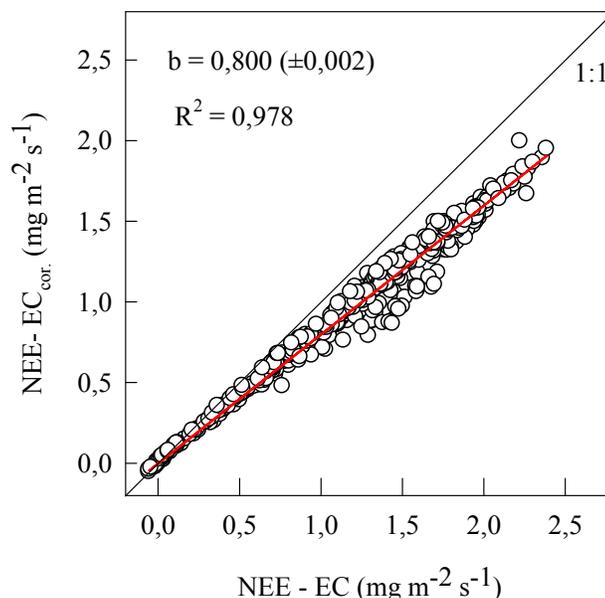
Fonte: Autor, 2015

Os valores estimados pelo BERB neste trabalho estão em concordância com os observados por Nassif, Marin e Costa (2014) em cana-de-açúcar na região de São Paulo, em que a relação  $ET/ET_0$  média foi 0,87, com variação entre 0,9 e 1,1. Valor superior médio (= 1,5) foi encontrado na região de Campos de Goytacazes (ESTEVEES et al., 2014). No semiárido brasileiro Silva et al. (2012) relataram ET média de 4,7 mm dia<sup>-1</sup>, com relações  $ET/ET_0$  entre 0,65 e 1,10. Os resultados obtidos por EC foram superiores aos relatados por Denmead et al. (2009) em duas regiões da Austrália, em que os valores médios de ET foram 3,3 e 3,75 mm dia<sup>-1</sup>. Assim, os resultados indicam que o BERB é o método que mais se aproxima das determinações por EC, mas com superestimativa. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que a partição de  $R_n-G$  entre H e  $\lambda E$  foi 68 e 32 %, respectivamente, que diferiu da obtida por EC, que foram 63% ( $\lambda E$ ) e 37% (H). Wolf et al. (2008) atribuem tal disparidade aos procedimentos de correção de  $\lambda E$ , que tendem a aumentar estes fluxos desproporcionalmente em relação a H, com efeito direto sobre a relação H/ $\lambda E$  ( $\beta$ ) do EC. Além disso, Barr et al. (1994) afirmam que em termos relativos as medidas de EC favorecem H, enquanto que as estimativas do BERB favorecem  $\lambda E$ .

#### **4.4 Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE)**

A troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) contabilizada pela técnica EC representa a diferença entre a assimilação de CO<sub>2</sub> e as perdas decorrentes pela planta, raízes e componentes do solo. Antes da utilização dos dados de NEE, é importante considerar que os vórtices que transportam gases traço, são os mesmos que conduzem consigo calor e vapor d'água que causam efeito direto na densidade do ar (HEUSINKVELD; JACOBS, HOLTSLAB, 2008). Assim, as medidas de NEE necessitam de correções para compensar os efeitos das flutuações de densidade para se tornarem válidas. Após as correções de NEE por WPL, foi observado que os valores obtidos superestimam os corrigidos em aproximadamente 20% (Figura 15). Estes resultados concordam com Liebethal e Foken (2003), que observaram redução de NEE entre 25 e 30% em pastagem após as correções WPL. Para Liu (2005), as correções WPL reduzem a magnitude de NEE em 1,4 e 2,5 vezes durante os períodos noturno e diurno, respectivamente, e que, quando os fluxos  $\lambda E$  e H são próximos de zero, por exemplo, na transição entre a noite e a manhã, correções não são necessárias, e por conseguinte as medidas brutas de NEE são iguais às corrigidas, uma vez que as correções são proporcionais à transferência de calor e vapor d'água.

**Figura 15 - Relação entre a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema obtida pela técnica da correlação de vórtices turbulentos (NEE-EC) e corrigida por WPL (NEE-EC<sub>cor.</sub>) para a cana-de-açúcar.**

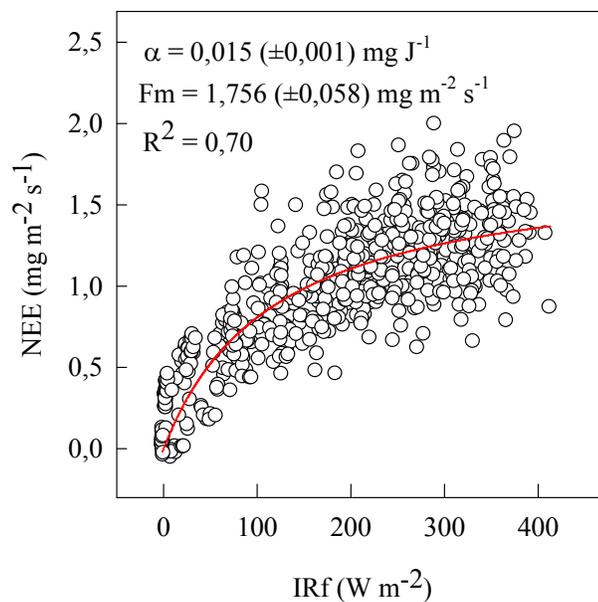


Fonte: Autor, 2015

Os valores de NEE são comumente relacionados com variáveis ambientais como temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e radiação solar. Entretanto, no geral, neste trabalho não foi observada influência da temperatura do ar e do DPV sobre o curso diurno de NEE, uma vez que a maior parte das medidas foi realizada durante o inverno. Assim, NEE foi avaliada em função de IRf, por ser a variável que melhor explica a sua variabilidade. O ajuste da hipérbole retangular entre IRf e NEE forneceu  $\alpha$  e Fm iguais a 0,015 mg CO<sub>2</sub> J<sup>-1</sup> e Fm de 1,756 mg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente, com R<sup>2</sup> de 0,70. Estes dois parâmetros são de suma importância para estimativa da assimilação de carbono através de diversos modelos mecanísticos, como o de Liu (1996), que recomenda a adoção de  $\alpha$  e Fm iguais a 0,011 mg J<sup>-1</sup> e 1,57 mg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, para a cana-de-açúcar, respectivamente (HARTT; BURR, 1967).

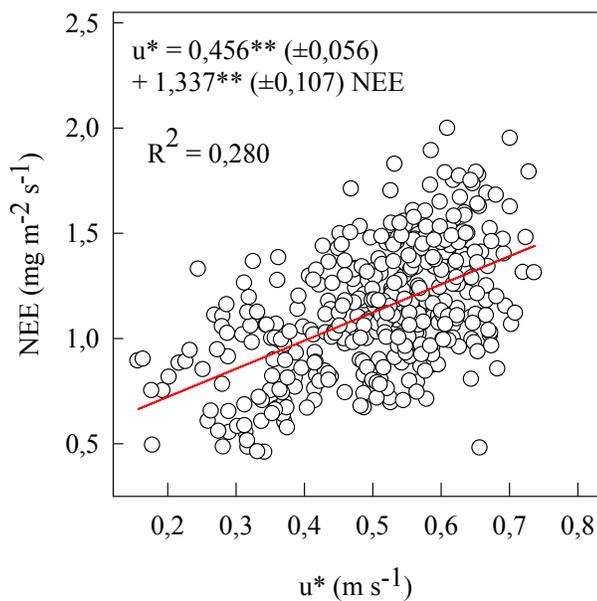
A NEE obtida por EC demonstra dependência de u\* (XU; BALLDOCCHI, 2004), sendo recomendados valores mínimos de u\* para se considerar a validade das medidas. Neste trabalho, tal dependência foi explicada pelo ajuste de uma equação linear (Figura 17). Quando se analisou diferentes intervalos de u\*, aumento de u<sub>z</sub> e NEE médio foram observados (Tabela 9). Isto ocorre porque a resistência da camada limite para transferência CO<sub>2</sub> diminui com aumento da velocidade do vento. Além disso, ventos fortes provocam vibração das folhas e aberturas temporárias no dossel, que permite maior absorção da radiação pelo interior da vegetação (BALDOCCHI; VERMA; ROSENBERG, 1981b).

**Figura 16 -** Relação entre a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) e irradiância solar fotossintética interceptada (IRf) durante o ciclo da cana-de-açúcar.  $\alpha$  eficiência quântica e fluxo máximo de CO<sub>2</sub> (Fm).



Fonte: Autor, 2015

**Figura 17 -** Relação entre a velocidade de fricção diária média ( $u^*$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) e a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) para a cultura da cana-de-açúcar.



Fonte: Autor, 2015

**Tabela 9 - Valores médios da velocidade do vento ( $u_z$ ,  $m s^{-1}$ ) e troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema (NEE,  $mg m^{-2} s^{-1}$ ) em função de diferentes intervalos de velocidade de fricção ( $u^*$ ,  $m s^{-1}$ ) durante o ciclo da cana-de-açúcar.**

| $u^*$<br>$m s^{-1}$       | $u_z$<br>$m s^{-1}$ | NEE<br>$mg m^{-2} s^{-1}$ |
|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| $u^* < 0,30$              | 2,58                | 0,57                      |
| $0,30 \leq u^* \leq 0,60$ | 2,83                | 0,97                      |
| $>0,60$                   | 3,65                | 1,15                      |

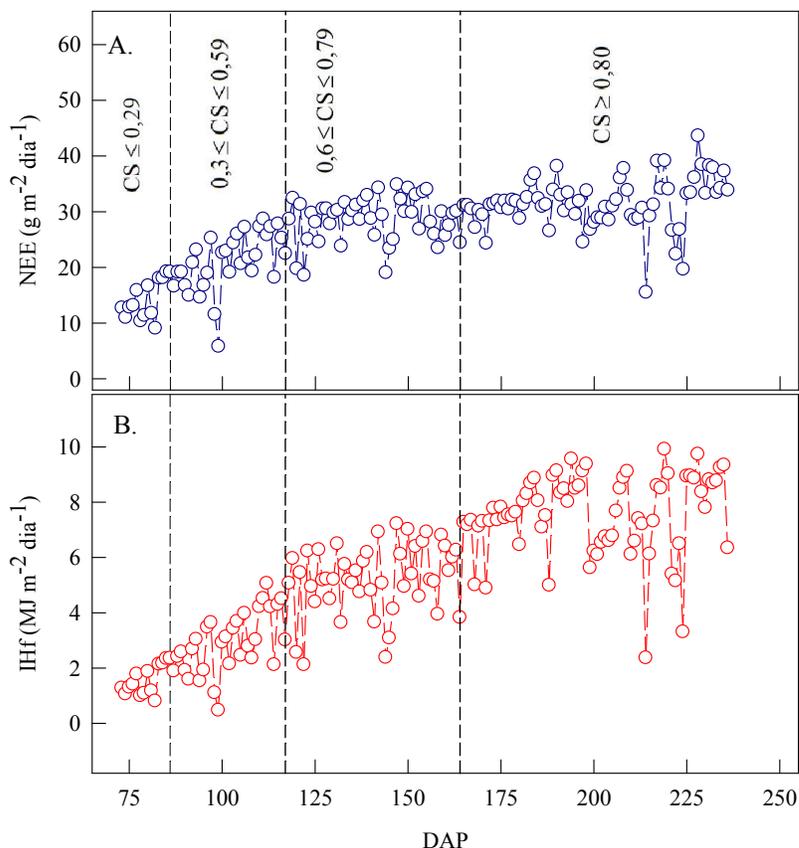
Fonte: Autor, 2015

Os acúmulos diários de NEE (Figura 18A) e IHf (Figura 18B) durante o ciclo da cultura em faixas de cobertura do solo foi analisado durante todo o período de avaliação (Figura 18). No início das medições (73 DAP), quando a cobertura do solo foi inferior a 29%, a IHf média foi  $1,6 MJ m^{-2}$  e variou entre 0,8 (82 DAP) e  $2,4 MJ m^{-2}$  (86 DAP), em dias classificados como nublado ( $K_t = 0,2$ ) e parcialmente nublado ( $K_t = 0,6$ ), respectivamente. Neste período, a NEE média diária foi  $14,2 g m^{-2}$  e os mínimos e máximos, 9,1 e  $19,2 g m^{-2}$ , respectivamente, ocorreram exatamente nos dias cujos totais de IHf também foram mínimos (82 DAP) e máximos (86 DAP). Os baixos valores de NEE foram decorrentes da baixa capacidade das plantas em interceptar a radiação solar, visto que o IAF médio neste subperíodo foi 0,5.

A análise de NEE e IHf no subperíodo  $0,3 \leq CS \leq 0,59$  demonstrou que os acúmulos diários se elevaram em relação ao subperíodo anterior. Assim, IHf apresentou média de  $2,9 MJ m^{-2}$  e variou entre 0,5 (99 DAP) e  $5,1 MJ m^{-2}$  (112 DAP), quando os dias foram nublado ( $K_t = 0,1$ ) e claro (0,7). Neste subperíodo a NEE média diária foi  $21,0 g m^{-2}$  e a mínima foi  $5,8 g m^{-2}$  aos 99 DAP. Entretanto, a máxima NEE foi registrada aos 111 DAP ( $4,5 MJ m^{-2}$ ), que não coincidiu com a máxima IHf, que como mencionado ocorreu aos 112 DAP. Desta forma, analisando as condições meteorológicas destes dois dias, as temperaturas do ar médias foram semelhantes,  $23,8$  (111 DAP) e  $23,7$  °C (112 DAP), não sendo fator limitante para a fotossíntese em nenhum dos dois dias. A ocorrência de maior assimilação de  $CO_2$  aos 112 DAP pode está relacionado com o grau de nebulosidade, visto que como este dia foi parcialmente nublado, a radiação solar é sujeita à maior espalhamento, e conseqüentemente mais aproveitada por folhas adjacentes. Suyker e Verma (2004) analisaram o efeito da radiação difusa na assimilação de  $CO_2$  pela cultura do milho, e observaram que a eficiência quântica dos dias nebulosos foram 23% maior em relação aos dias claros. Tal comportamento também foi observado em trigo, triticale, milho e girassol no Sudoeste da França, cuja eficiência quântica média das culturas em dias nebulosos foi 52% superior em relação aos

dias claros (BÉZIAT; CESCHIA; DEDIEU, 2009). Na região do presente estudo, na maioria dos dias do ano o céu apresenta-se parcialmente nublado, sobretudo no inverno, o que se tornaria uma vantagem considerando que neste período há maior disponibilidade hídrica.

**Figura 18 - Valores diários da troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema - NEE (A) e irradiação solar fotossintética interceptada - IHf (B) em função de dias após o plantio em intervalos de cobertura do solo.**



Fonte: Autor, 2015

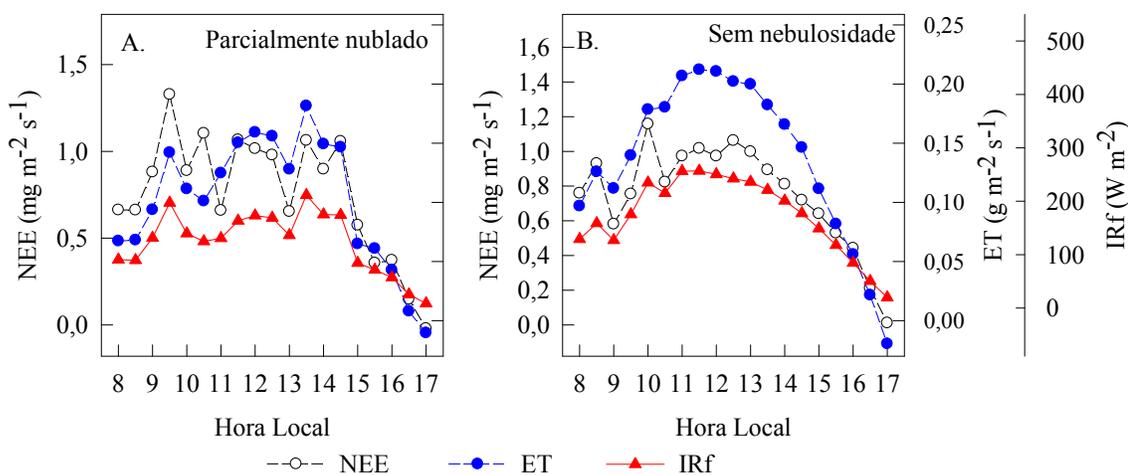
No subperíodo que compreendeu  $0,6 \leq CS \leq 0,79$ , IHf e NEE continuaram a aumentar em relação ao subperíodo anteriormente analisado. IHf apresentou valores diários que oscilaram entre 2,1 (122 DAP) e 7,2 MJ m<sup>-2</sup> (147 DAP), em dias classificados como nublado ( $K_t = 0,2$ ) e parcialmente nublado (0,6), respectivamente, com média de 5,2 MJ m<sup>-2</sup>, 44% superior à média do subperíodo anterior. A variação diária de NEE demonstrou média de 28,6 g m<sup>-2</sup>, aproximadamente 27% superior ao subperíodo anteriormente discutido, e máximos e mínimos de 18,6 (122 DAP) e 34,8 g m<sup>-2</sup> (147 DAP), respectivamente, que coincidiram com os valores extremos de IHf. Durante o último subperíodo avaliado ( $CS \geq 0,8$ ) a IHf variou entre 2,2 (214 DAP) e 9,9 MJ m<sup>-2</sup> (219 DAP), em dias caracterizados como nublado ( $K_t = 0,2$ ) e claro ( $K_t = 0,7$ ), respectivamente. O valor médio de IHf foi 7,6 MJ m<sup>-2</sup>, que foi 32%

superior à média observada no subperíodo anterior. Estes resultados concordam com os Ferreira Junior et al. (2012), que avaliaram a interceptação da radiação solar em variedades de cana-de-açúcar na mesma região deste estudo e obtiveram máximos entre 7,5 e 9,0 MJ m<sup>-2</sup>, entre 194 e 365 DAC. O NEE diário médio foi 31,6 g m<sup>-2</sup> e os maiores e menores acúmulos, 15,5 (214 DAP) e 43, g m<sup>-2</sup> (219 DAP), também foram registrados nos dias em ocorreram os máximos e mínimos valores de IHf. Em relação ao subperíodo anterior, a média diária de IHf foi superior em cerca de 32%, enquanto que a NEE média apresentou-se apenas 9% maior em relação ao anteriormente observado.

#### 4.4.1 NEE versus nebulosidade

Os padrões diurnos de NEE e ET durante 20/07/2013, classificado como parcialmente nublado (Kt = 0,6), apresentaram-se instáveis ao longo do dia. Às 8:00 h NEE e ET foram, respectivamente, 0,66 mg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e 0,07 g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, e aumentou até que NEE foi máxima às 9:30 h (1,33 mg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), quando IRf foi 197,0 W m<sup>-2</sup>. Logo após, os fluxos foram oscilantes até que às 13:30 h ET foi máxima (0,18 g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) juntamente com IRf (211,3 W m<sup>-2</sup>). Em seguida, NEE e ET decaíram seguindo a tendência de IRf, com ligeiro aumento às 14:30 h (Figura 19A). Neste dia, os totais diários de NEE e ET e IRf foram, respectivamente, 26,5 e 3.671,5 g m<sup>-2</sup> e 4,5 MJ m<sup>-2</sup>, com  $\alpha$  de 5,9 g CO<sub>2</sub> MJ<sup>-1</sup> (Tabela10).

**Figura 19 - Variação diurna da troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), evapotranspiração da cultura (ET) e irradiância solar fotossintética interceptada (IRf) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07/2013 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).**



Fonte: Autor, 2015

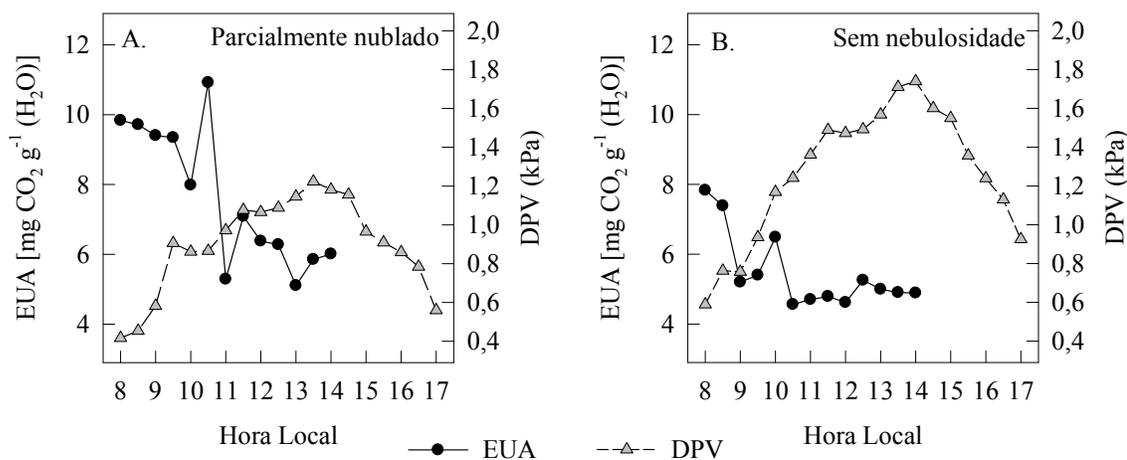
**Tabela 10 - Totais diários da troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), evapotranspiração da cultura (ET), irradiância solar fotossintética interceptada (IHf), eficiência no uso da água (EUA) e eficiência quântica ( $\alpha$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).**

| Parâmetro  | Data                 |                  |
|--|----------------------|------------------|
|  | 20/07/2013           | 27/07/2013       |
|  | Parcialmente nublado | Sem nebulosidade |
| NEE (g m <sup>-2</sup> )                                       | 26,5                 | 29,7             |
| ET (g m <sup>-2</sup> )  | 3.671,5              | 4.946,3          |
| IHf (MJ m <sup>-2</sup> )                                      | 4,5                  | 6,2              |
| EUA [(mg CO <sub>2</sub> (g H <sub>2</sub> O) <sup>-1</sup> )] | 7,2                  | 6,0              |
| $\alpha$ (g CO <sub>2</sub> MJ <sup>-1</sup> )                 | 5,9                  | 4,8              |

Fonte: Autor, 2015

Em relação à EUA, esta foi analisada entre às 8:00 h e 14:00 h para evitar valores de ET e NEE negativos ou próximos da nulidade. Assim, o curso diário de EUA, ao longo de 20/07/2013, apresentou valor praticamente constante entre 8:00 e 9:30 h, com variação entre 9,3 (DPV = 0,91 kPa) e 9,8 mg CO<sub>2</sub> (g H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup> (DPV = 0,42 kPa). Em seguida EUA decaiu para 8,0 mg CO<sub>2</sub> (g H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup> às 10,0h, e apresentou máximo às 10:30 h [10,9 mg CO<sub>2</sub> (g H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>], quando o DPV foi 0,87 kPa. Após o máximo, EUA decaiu com ligeiras oscilações à medida que o DPV se elevou (Figura 20A). Ainda neste dia, o valor médio de EUA foi de 7,2 mg CO<sub>2</sub> (g H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup> (Tabela10).

**Figura 20 - Variação diária da eficiência no uso da água (EUA) e do déficit de pressão de vapor (DPV) para a cana-de-açúcar durante os dias 20/07 (parcialmente nublado) e 27/07/2013 (sem nebulosidade).**



Fonte: Autor, 2015

Durante o dia 27/07/2013, classificado como sem nebulosidade ( $K_t = 0,7$ ), NEE e ET foram oscilantes durante toda a manhã, com valores de  $0,76 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0,10 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  às 8:00 h, respectivamente, e oscilação até meio dia, com máximo valor de NEE registrado às 10:00 h ( $1,16 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), quando IRf foi  $234,8 \text{ W m}^{-2}$ . Enquanto isso, ET foi máxima às 11:30 h ( $0,21 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), que coincidiu com a máxima IRf ( $256,9 \text{ W m}^{-2}$ ). Ainda neste dia, a partir das 12:30 h quando NEE e ET foram, respectivamente,  $1,06 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0,20 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , a tendência destes fluxos foi de decréscimo conforme a diminuição da IRf ao entardecer (Figura 19B). Os totais acumulados de NEE, ET e IRf foram  $29,7$  e  $4.627,5 \text{ g m}^{-2}$  e  $6,2 \text{ MJ m}^{-2}$ , respectivamente, com  $\alpha$  de  $4,8 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 10).

A ocorrência do pico de NEE no período da manhã, quando IRf não foi máxima, e diminuição próximo às 12,0 h também foi observada em culturas como soja e videira, e tais fenômenos foram atribuídos ao fato de que o aumento da intensidade da radiação solar e temperatura do ar nestas horas do dia reduzem a condutância estomática de maneira a se evitar a perda excessiva de água, que conseqüentemente diminui a assimilação  $\text{CO}_2$  pelas folhas (ANDERSON et al., 1984; GUO et al., 2014).

A EUA, durante 27/07/2013 diminuiu entre às 8:00 h [ $(8,4 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}; \text{DPV} = 0,76 \text{ kPa}]$  e 9:30 h [ $6,0 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}; 0,75 \text{ kPa}]$  conforme o DPV aumentou, com elevada taxa de variação positiva até às 10,0 h [ $7,1 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$ ], quando o DPV foi  $1,16 \text{ kPa}$ , e tendência de estabilização até às 14:00 h (Figura 20B). A média diária de EUA neste dia foi  $6,0 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$ . (Tabela 10). Ao se comparar os padrões diurnos dos dias anteriormente descritos, observou-se que sob condição de céu parcialmente nublado a cana-de-açúcar apresentou maior EUA, em consequência do maior assimilação de  $\text{CO}_2$  e menor ET.

#### 4.4.2 NEE versus disponibilidade hídrica

Os padrões de NEE e ET também foram avaliados durante os dias 06/10/2013, que antecedeu 13 dias sem chuva, e 20/10/2013 após a ocorrência de  $141,2 \text{ mm}$  de chuva. Durante 06/10 a cultura encontrava-se com IAF de  $3,2$ , o  $K_t$  indicou céu claro ( $0,7$ ) e o ARM foi próximo à  $A_{uc}$  ( $132,9 \text{ mm}$ ). Às 8:00 h NEE foi  $1,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e ET se mostrou máxima ( $0,16 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), com IRf de  $311,6 \text{ W m}^{-2}$ . Em seguida NEE se elevou até às 9:00 h ( $1,8 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), quando foi máxima com IRf de  $341,1 \text{ W m}^{-2}$ , e decaimento ao entardecer, com oscilações às 12:00 h ( $1,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e 15:00 h ( $1,0 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), enquanto que ET apresentou padrão praticamente constante até às 13:00 h, com variação entre  $0,12$  e  $0,15 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , e pequena

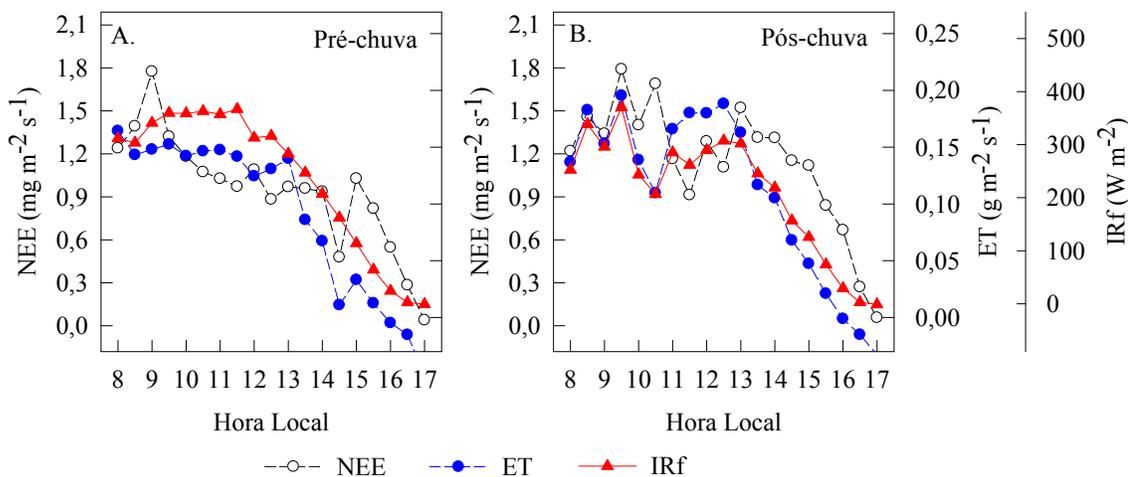
diminuição às 12:00 h, logo após a máxima IRf ( $367,1 \text{ W m}^{-2}$ ) que ocorreu às 11,5 h (Figura 21A). Os totais diários de NEE, ET e IRf foram, respectivamente,  $31,2$  e  $3.051,8 \text{ g m}^{-2}$  e  $9,6 \text{ MJ m}^{-2}$ , que resultou em  $\alpha$  de  $3,3 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$  (Tabela 11).

A EUA durante este dia foi de  $10,2 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$  (Tabela 11) e apresentou aumento entre 8:30 h [ $8,2 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$ ; DPV =  $0,84 \text{ kPa}$ ] e 10:30 h [ $5,3 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$ ; DPV =  $1,93$ ] e decréscimo até às 11:30 h [ $4,8 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$ ; DPV =  $2,0 \text{ kPa}$ ], quando foi mínima. Em seguida, EUA oscilou até aumentar a partir das 13:00 h (Figura 22A).

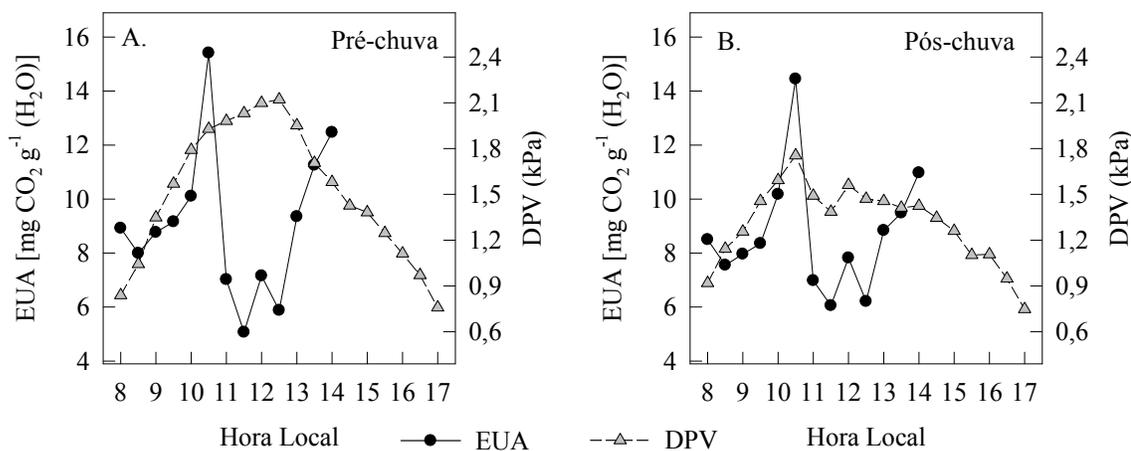
Durante o dia 20/10/2013 o Kt indicou céu parcialmente nublado (0,6) e o ARM encontrava-se no Acc em decorrência dos vários eventos de precipitação (Figura 5D). Neste dia NEE e ET foram mais oscilantes em relação ao dia anteriormente discutido. Às 8:00 h NEE e ET foram  $1,22 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0,14 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Logo após os fluxos oscilaram até NEE, ET e IRf se apresentarem máximos às 9:30 h, com  $1,79 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $0,20 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $370,5 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente. Após o pico, os fluxos se mostraram oscilantes até às 12:30 h, a partir da qual os valores diminuíram gradativamente conforme IRf diminuiu (Figura 22B). Neste dia  $\alpha$  foi  $4,2 \text{ g CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$  e NEE, ET e Rf totalizaram  $37,8$  e  $3.729,0 \text{ g m}^{-2}$  e  $8,9 \text{ MJ m}^{-2}$ , respectivamente (Tabela 11).

Ao longo do dia EUA média foi  $9,0 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$  (Tabela 11) com aumento entre as primeiras horas até o máximo às 10:30 h [ $14,5 \text{ mg CO}_2 (\text{g H}_2\text{O})^{-1}$ ; DPV =  $1,75 \text{ kPa}$ ]; em seguida EUA decaiu com oscilações e se elevou ao entardecer (Figura 21B).

**Figura 21 - Variação diurna da troca líquida de  $\text{CO}_2$  do ecossistema (NEE), evapotranspiração da cultura (ET) e irradiância solar fotossintética interceptada (IRf) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10/2013 (pré- chuva) e 20/10/2013 (após chuva).**



**Figura 22 - Variação diária da eficiência no uso da água (EUA) e do déficit de pressão de vapor (DPV) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva).**



Fonte: Autor, 2015

A partir destes resultados observou-se que apesar dos dias 06/10 e 20/10/2013 apresentarem IRf e condições de nebulosidades semelhantes e que apenas o ARM do primeiro dia citado estava próximo ao limite de  $A_{uc}$ , os valores de EUA foram análogos. Entretanto, como no dia 20/10/2013 o solo encontrava-se acima da  $A_{cc}$ , os totais diários de ET e NEE foram superiores ao do dia 06/10/2013 em 18,2 e 17,3%, respectivamente.

**Tabela 11 - Totais diários da troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), evapotranspiração da cultura (ET), irradiação solar fotossintética interceptada (IHf), eficiência no uso da água (EUA) e eficiência quântica ( $\alpha$ ) para a cana-de-açúcar durante os dias 06/10 (pré-chuva) e 20/10/2013 (pós-chuva).**

| Parâmetro  | Data       |            |
|--|------------|------------|
|  | 06/10/2013 | 20/10/2013 |
|  | Pré-chuva  | Pós-chuva  |
| NEE (g m <sup>-2</sup> )                                       | 31,2       | 37,8       |
| ET (g m <sup>-2</sup> )  | 3.505,5    | 4.183,5    |
| IHf (MJ m <sup>-2</sup> )                                      | 9,6        | 8,9        |
| EUA [(mg CO <sub>2</sub> (g H <sub>2</sub> O) <sup>-1</sup> )] | 8,9        | 9,0        |
| $\alpha$ (g CO <sub>2</sub> MJ <sup>-1</sup> )                 | 3,3        | 4,2        |

Fonte: Autor, 2015

Ao longo de todos os dias avaliados a EUA obtida foi de 7,02 mg CO<sub>2</sub> (g H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>. Os valores de EUA aqui demonstrados foram superiores aos valores médios encontrados por Cabral et al. (2013) em dois ciclo de cana-de-açúcar, que foram 4,1 e 4,4 mg CO<sub>2</sub> g (H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>, com maiores valores entre 4,8 e 5,0 mg CO<sub>2</sub> g (H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup> durante o período de crescimento, que

ocorreu entre 241 e 392 dias após a colheita. Para cultura do sorgo, variação diurna entre 6,5 e 11,9 mg CO<sub>2</sub> (g H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup> foi observada (ANDERSON e VERMA, 1986).

#### 4.5 Condutâncias

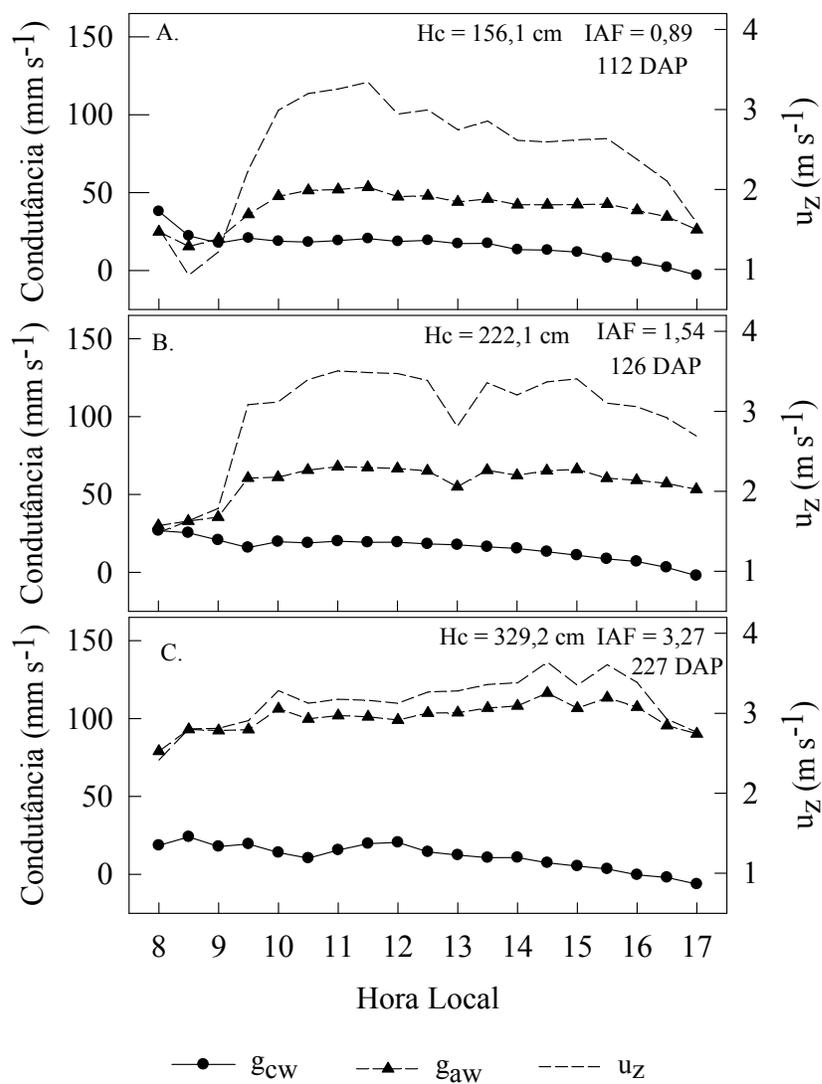
Os padrões diários de  $g_{aw}$  seguiram nitidamente o comportamento de  $u_z$ , com menores valores durante o turno matutino e maiores ao longo do vespertino, como também observado para  $u_z$  (Figura 23). Para a condição de dossel incompleto aos 112 DAP (IAF = 0,89), a oscilação de  $g_{aw}$  esteve entre 15,4 e 53,5 mm s<sup>-1</sup>, com média de 39,7 mm s<sup>-1</sup> (Figura 23A). Quando o dossel apresentou-se maior índice de crescimento aos 126 DAP (IAF = 1,54), o valor médio de  $g_{aw}$  foi 57,7 mm s<sup>-1</sup>, com variação entre 30,0 e 67,9 mm s<sup>-1</sup> (Figura 23B). E por fim, considerando-se o desenvolvimento do dossel próximo do máximo aos 227 DAP (IAF = 3,27), as magnitudes variaram entre 79,0 e 116,4 mm s<sup>-1</sup>, com média de 100,9 mm s<sup>-1</sup> (Figura 23C). Em relação à  $g_{cw}$ , os máximos valores oscilaram entre 24,0 mm s<sup>-1</sup> (227 DAP) e 37,9 (112 DAP), contudo, em termos médios,  $g_{cw}$  foi semelhante para todas as condições analisadas, sendo 15,7 (112 DAP), 15,5 (227 DAP) e 11,3 mm s<sup>-1</sup> (227 DAP).

Similarmente, em estudo com a cultura do milho na Califórnia-EUA, em clima Mediterrâneo, Steduto e Hsiao (1998) observaram aumento de  $g_{aw}$  à medida que o dossel da cultura se desenvolveu com valor de 15,0 mm s<sup>-1</sup> para condição incompleta (IAF = 0,58) e 90 mm s<sup>-1</sup> para o completo desenvolvimento. Além disso, como observado nesta pesquisa, a ocorrência de maiores valores de  $g_{aw}$  e  $u_z$  no período da tarde também foi destacada por estes autores. Cabral et al. (2012) também avaliaram os padrões de condutância da cana-de-açúcar na região de São Paulo e relataram aumento de  $g_{aw}$  de 20,0 para 80,0 mm s<sup>-1</sup> à medida que o dossel da cultura se desenvolveu, sendo tal aumento também atribuído à diminuição da distância entre a cultura e o anemômetro sônico.

Os trabalhos presentes na literatura tem comumente avaliado a influência do DPV sobre  $g_{cw}$ , entretanto, normalizando este último pelo IAF, para obtenção da condutância em base de área foliar (CABRAL et al., 2008); ou pela irradiância solar fotossintética, uma vez que a radiação é um estímulo primário da abertura estomática e o DPV, por sua vez, um estimulante ao seu fechamento (GRANTZ e MEINZER, 1991; GRANTZ; MOORE; ZEIGER et al., 1987). Desta forma,  $g_{cw}/IAF$  apresentou tendência de diminuição à medida que o DPV aumentou, de modo que aproximadamente a partir de valores de 1,5 kPa,  $g_{cw}/IAF$  diminuiu para valores aproximados de 10 mm s<sup>-1</sup> (Figura 24A). Estes resultados reforçam as observações de Cabral et al. (2008), que em cultivo de cana-de-açúcar na região de São Paulo

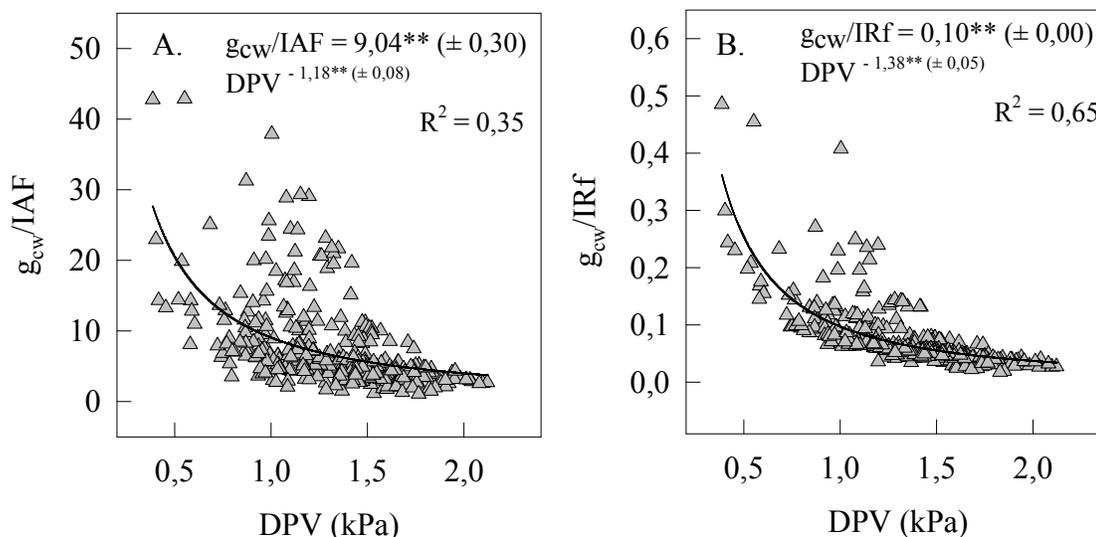
observaram que valores de DPV à partir de 1,5 kPa resultam em  $g_{cw}/IAF$  abaixo de  $11,5 \text{ mm s}^{-1}$ . E considerando-se a relação  $g_{cw}/IRf$ , este também demonstrou decréscimo próximo a 1,5 kPa (Figura 24B).

**Figura 23 - Condutância aerodinâmica ( $g_{aw}$ ), condutância do dossel para vapor d'água ( $g_{cw}$ ) e velocidade do vento ( $u_z$ ) durante três dias ao longo do ciclo da cana-de-açúcar.**



Fonte: Autor, 2015

**Figura 24 - Relação entre o déficit de pressão de vapor e a condutância do dossel para vapor d'água normalizada pelo índice de área foliar -  $g_{cw}/IAF$  (A) e irradiância solar fotossintética interceptada -  $g_{cw}/IRf$  (B) durante o ciclo da cana-de-açúcar.**



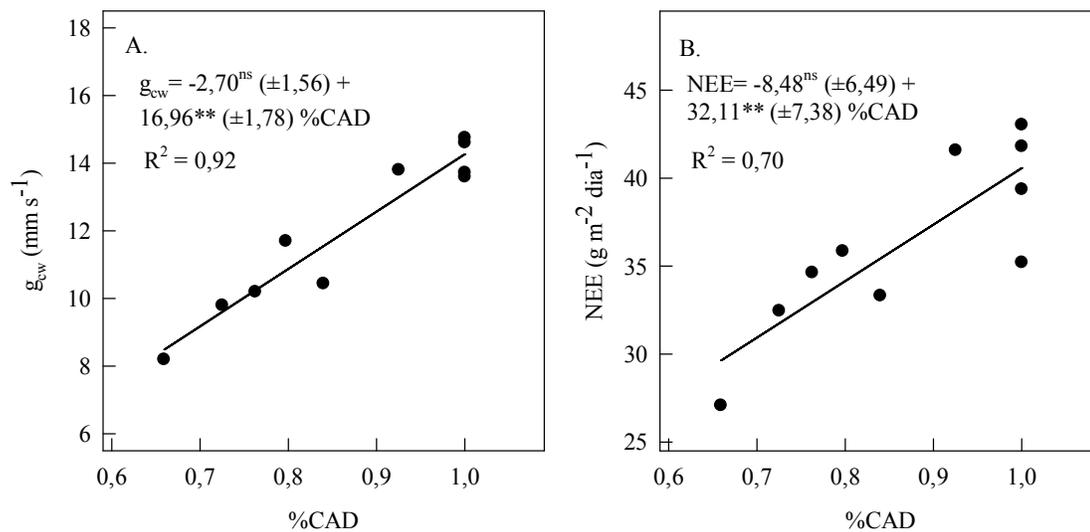
Fonte: Autor, 2015

Além do DPV, a influência da disponibilidade hídrica do solo (%CAD) sobre  $g_{cw}$  e NEE foi avaliada, considerando-se dias com condições de nebulosidade e graus de desenvolvimento do dossel semelhantes. Deste modo, os resultados demonstraram diminuição linear de  $g_{cw}$  de aproximadamente 34,0% à medida que o %CAD diminui, com valor mínimo de  $9,8 \text{ mm s}^{-1}$  para 72,5% da CAD e máximo de  $14,8 \text{ mm s}^{-1}$  para 100% da CAD (Figura 25A). Em relação à influência do %CAD sobre NEE, o último reduziu linearmente cerca de 25,0% à medida que a disponibilidade hídrica diminuiu, com oscilação entre 27,1 e  $43,0 \text{ g m}^{-2}$  dia, para valores médios de %CAD de 65,9 e 100%, respectivamente (Figura 25B).

O efeito da disponibilidade hídrica sobre as trocas gasosas em variedades de cana-de-açúcar foi estudado por Gonçalves et al. (2010) com medidas em folhas individuais, e seus resultados demonstraram redução média de aproximadamente 51,6% e 49,5 % na condutância estomática e fotossíntese líquida, respectivamente, quando as plantas foram submetidas a disponibilidade hídrica equivalente entre 40 e 60% da CAD. Efeitos semelhantes foram relatados por Smit e Singels (2006) em variedades de cana-de-açúcar, com decréscimo da condutância quando o solo apresentou conteúdo relativo de água a partir de 73%. Graça et al. (2010) também demonstraram diminuição na fotossíntese, como na eficiência quântica de variedades de cana-de-açúcar com redução da disponibilidade hídrica. Para Inman-Bamber e Smith (2005) a condutância estomática é controlada pelas raízes, possivelmente por sinais químicos, e que a redução nas trocas gasosas em função da disponibilidade hídrica está

relacionada ao fechamento estomático, que ocorre como forma de evitar ou retardar o estresse hídrico.

**Figura 25 - Relação entre o percentual da água disponível no solo (%CAD), condutância do dossel para vapor d'água –  $g_{cw}$  (A) e troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema – NEE (B) durante o ciclo da cana-de-açúcar.**



Fonte: Autor, 2015

## 5 CONCLUSÕES

O albedo e as relações entre o saldo de radiação ( $R_n$ ) e radiação global ( $R_g$ ) e balanço de ondas longas (BOL) e  $R_g$  apresentaram-se semelhantes independentemente do grau de nebulosidade.

Os padrões diurnos dos componentes do balanço de energia foram dependentes das condições de nebulosidade, de modo que sob ótimas condições hídricas a maior parcela da energia disponível foi empregada no processo de evapotranspiração, com maiores relações entre fluxo de calor latente e saldo de radiação em dias claros; enquanto isso, as relações entre fluxo de calor sensível e saldo de radiação foram maiores sob céu parcialmente nublado. Quando se considerou condições hídricas não ideais, a maior energia disponível foi repartida quase que igualmente entre os processos de evapotranspiração e aquecimento do ar.

Dentre os métodos de estimativa de evapotranspiração da cultura, o método do balanço de energia - razão de Bowen é o que mais se aproxima das determinações pela técnica EC, seguido pelas estimativas do método residual a partir das medidas H. O método FAO 56 apresentou a maior discrepância em relação ao EC, uma vez que na região deste estudo, o método tende a subestimar a ET à medida que a disponibilidade hídrica decresce.

Os valores diários da troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema foram dependentes do índice de área foliar e/ou cobertura do solo. Sob ótimas condições hídricas, o acúmulo diário de  $CO_2$  foi praticamente igual para dias sem nebulosidade e parcialmente nublados, com maior eficiência quântica e no uso da água sob céu parcialmente nublado. Quando a disponibilidade hídrica foi limitada, o acúmulo diário de  $CO_2$  apresentou redução, entretanto a eficiência no uso da água foi aproximadamente a mesma sob ótima condição hídrica. A eficiência quântica e o máximo fluxo de  $CO_2$  durante o ciclo da cana-de-açúcar foram, respectivamente,  $0,015 \text{ mg } CO_2 \text{ J}^{-1}$  e  $1,756 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

## REFERÊNCIAS

- ABREU, M.L. et al. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, v. 72, n. 3, p. 262-270, 2013.
- ADAMS, J. E.; ARKIN, G. F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 4, p. 789-792, 1977.
- ALBERTO, M.C.R. et al. Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. **Field Crops Research**, v. 160, p. 12-21, 2014.
- ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. FAO, Rome, v. 300, p. 6541, 1998.
- ALLEN, R. et al. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 921-929, 2011.
- ALMEIDA, A.C.S. et al. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.
- ANDERSON, D.E. et al. Eddy correlation measurements of CO<sub>2</sub> latent heat, and sensible heat fluxes over a crop surface. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 29, p. 263-272, 1984.
- ANDERSON, D.E.; VERMA, S.B. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat exchanges of a grain sorghum canopy. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 34, n. 4, p. 317-331, 1986.
- ANDRÉ, R.G.B. et al. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 375-382, 2010.
- ASHKTORAB, W.O.H. et al. Energy balance determinations close to the soil surface using a micro-Bowen ratio system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 46, n. 3, p. 259-274, 1989.
- BALDOCCHI, D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C<sub>3</sub> (wheat) and C<sub>4</sub> (corn) crop: II. CO<sub>2</sub> exchange and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 67, n. 3, p. 291-321, 1994.
- BALDOCCHI, D.A. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 479-492, 2003.
- BALDOCCHI, D. et al. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v. 69, n.5, p. 1331-1340, 1988.

BALDOCCHI, D. et al. 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.

BALDOCCHI, D.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Mass and energy exchanges of a soybean canopy under various environmental regimes. **Agronomy Journal**, v. 73, n. 4, p. 706-710, 1981a.

BALDOCCHI, D.D.; VERMA, S.B.; ROSENBERG, N.J. Seasonal and diurnal variation in the  $\text{CO}_2$  flux and  $\text{CO}_2$ -water flux ratio of alfalfa. **Agricultural Meteorology**, v. 23, p. 231-244, 1981b.

BERBIGIER, P.; BONNEFOND, J.M.; MELLMANN, P.  $\text{CO}_2$  fluxes and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, n. 3, p. 183-197, 2001.

BATISTA, E.L.S. et al. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1080-1087, 2013.

BARR, A.G. et al. A comparison of Bowen ratio and eddy correlation sensible and latent heat flux measurements above deciduous forest. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 71, n. 1-2, p. 21-41, 1994.

BÉZIAT, P.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 10, p. 1628-1645, 2009.

BIUDES, M.S. et al. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 135-143, 2009.

BLAND, J. M.; ALTMAN, D.G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **The Lancet**, v. 327, n. 8476, p. 307-310, 1986.

BORGES, C.J.R. et al. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 393-399, 2008.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; GHIBERTO, P.J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 295-303, 2009.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, n. 6, p. 779-787, 1926.

CABRAL, O. M. R. et al. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e  $\text{CO}_2$  sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, n. 1, p. 61-70, 2003.

CABRAL, O.M.R. et al. Water use in a sugarcane plantation. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 4, n. 5, p. 555-565, 2012.

CABRAL, O.M.R. et al. Fluxes of CO<sub>2</sub> above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182-183, p. 59-66, 2013.

CAMMALLERI, C. et al. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. **Agricultural Water Management**, v. 120, p. 89-97, 2013.

CHÁVEZ, J. L.; HOWELL., T. A.; COPELAND, K. S. Evaluating eddy covariance cotton ET measurements in an advective environment with large weighing lysimeters. **Irrigation Science**, v. 28, n. 1, p. 35-50, 2009.

CONAB, C.N.D.A. Cana-de-açúcar - Série histórica. 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em 19/01/2015.

DENMEAD, O. T. et al. Evaporation and carbon dioxide exchange by sugar-cane crops. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 31, p. 116-124, 2009.

DING, R. et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 1, p. 87-95, 2010.

DONALDSON, R.A.. et al. Season effects on productivity of some commercial South African sugarcane cultivars, I: Biomass and radiation use efficiency. **Proceedings of The South African Sugar Technologists Association**, v. 81, p. 517-527, 2008.

EBRAHIM, M.K. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, p. 593-602, 1998.

ER-RAKI, S. et al. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. **Agricultural Water Management**, v. 122, p. 12-19, 2013.

ESTEVEZ, B.S. et al. Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 4, p. 663-670, 2012.

ESTEVEZ, B.S. et al. Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar utilizando a razão de Bowen. **Irriga**, v. 19, n. 3, p. 441-452, 2014.

FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, n. 1, p. 43-69, 2001.

FAOSTAT, Food. Agriculture organization of the United Nations. **Statistical database**, 2013. Disponível em: [faostat.fao.org](http://faostat.fao.org). Acesso em 19/01/2015.

- FARIAS, C.H. A. et al. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 3, p. 494-506, 2008.
- FERREIRA JUNIOR, R. A. et al. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1229-1236, 2012.
- FOKEN, T. et al. Some aspects of the energy balance closure problem. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 12, p. 4395-4402, 2006.
- GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, n. 2, p. 127-140, 2007.
- GIAMBELLUCA, T.W. et al. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 8, p. 1365-1376, 2009a.
- GIAMBELLUCA, T.W. et al. Evapotranspiration and energy balance of native wet montane cloud forest in Hawai'i. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 2, p. 230-243, 2009b.
- GONÇALVES, E.R. et al. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010.
- GRAÇA, J.P. et al. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 22, n. 3, p. 189-197, 2010.
- GRANTZ, D.A.; MEINZER, F.C. Regulation of transpiration in field-grown sugarcane: evaluation of the stomatal response to humidity with the Bowen ratio technique. **Agricultural and forest meteorology**, v. 53, n. 3, p. 169-183, 1991.
- GRANTZ, D. A.; MOORE, P. H.; ZEIGER, E. Stomatal responses to light and humidity in sugarcane: prediction of daily time courses and identification of potential selection criteria. **Plant, Cell & Environment**, v. 10, n. 3, p. 197-204, 1987.
- GUERRA, A. et al. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Revista Agrarian**, v. 7, n. 24, p. 211-217, 2014.
- GUO, W.H. et al. Variation of NEE and its affecting factors in a vineyard of arid region of northwest China. **Atmospheric Environment**, v. 48, p. 349-354, 2014.
- HARTT, C. E. et al. Factors affecting photosynthesis in sugar cane. **Proceedings of the International Society of Sugarcane Technologists; 12th Congress, Puerto Rico, 1965**. Puerto Rico, 1967. p. 590-608.
- HE, H. et al. Uncertainty analysis of eddy flux measurements in typical ecosystems of ChinaFLUX. **Ecological Informatics**, v. 5, n. 6, p. 492-502, 2010.

HELDWEIN, A.B. et al. Saldo de radiação diurno em dosséis de batata como função da radiação solar global. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 96-104, 2012.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar da cana-de-açúcar. **STAB**, v. 99, n. 5, 1999.

HERNANDEZ-RAMIREZ, G. et al. Energy balance and turbulent flux partitioning in a corn-soybean rotation in the Midwestern US. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, p. 79-92, 2010.

HEUSINKVELD, B.G.; JACOBS, A.F.G.; HOLTSLAG, A.A.M. Effect of open-path gas analyzer wetness on eddy covariance flux measurements: A proposed solution. **agricultural and forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1563-1573, 2008.

HIPPS, L. E.; ASRAR, G.; KANEMASU, E. T. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. **Agricultural Meteorology**, v. 28, n. 3, p. 253-259, 1983.

HOLLAND, S. et al. Micro-Bowen ratio system for measuring evapotranspiration in a vineyard interrow. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 177, p. 93-100, 2013.

IDSO, S. B. et al. A method for determination of infrared emittance of leaves. **Ecology**, v. 50, n. 5, p. 899-902, 1969.

IDSO, S.B. et al. The dependence of bare soil albedo on soil water content. **Journal of Applied Meteorology**, v. 14, p. 109-113, 1975.

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v. 36, p. 41-51, 1994.

\_\_\_\_\_. Climate and water as constraints to production in the South African sugar industry. **Proceedings of The South African Sugar Technologists Association**, p. 55-59, 1995.

\_\_\_\_\_.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, n. 2, p. 125-138, 2003.

\_\_\_\_\_.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2, p. 185-202, 2005.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York, Academic press, 1983, 416 p.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008.

KAR, G.; KUMAR, A. Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. **Irrigation Science**, v. 28, n. 3, p. 211-220, 2010.

- KONDO, F.; TSUKAMOTO, O. Air-sea CO<sub>2</sub> flux by eddy covariance technique in the equatorial Indian Ocean. **Journal of Oceanography**, v. 63, n. 3, p. 449-456, 2007.
- KUSTAS, W.P.; STANNARD, D.I.; JERRY ALLWINE, K. Variability in surface energy flux partitioning during Washita'92: Resulting effects on Penman-Monteith and Priestley-Taylor parameters. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, n. 1, p. 171-193, 1996.
- LEITÃO, M.M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 214-218, 2000.
- LI, Z. et al. Energy balance closure at ChinaFLUX sites. **Science in China**, v. 48, p. 51-52, 2005.
- LI, S. et al. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 11, p. 1214-1222, 2008.
- LIEBETHAL, C.; FOKEN, T. On the significance of the Webb correction to fluxes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 109, n. 1, p. 99-106, 2003.
- LIU, D.L. Incorporating diurnal light variation and canopy light attenuation into analytical equations for calculating daily gross photosynthesis. **Ecological Modelling**, v. 93, n. 1, p. 175-189, 1996.
- LIU, H. An alternative approach for CO<sub>2</sub> flux correction caused by heat and water vapour transfer. **Boundary-layer Meteorology**, v. 115, n. 1, p. 151-168, 2005.
- LIU, H.; FOKEN, T. A modified Bowen ratio method to determine sensible and latent heat fluxes. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 10, n. 1, p. 71-80, 2001.
- LIU, Y.; LUO, Y. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 1, p. 31-40, 2010.
- LIU, G. et al. A novel method to convert daytime evapotranspiration into daily evapotranspiration based on variable canopy resistance. **Journal of Hydrology**, v. 414, p. 278-283, 2012.
- LYRA, G.B. et al. Crescimento e produtividade do milho, submetido a doses de nitrogênio nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Ceres**, v. 61, n. 4, p. 578-586, 2014.
- LYRA, G. B. et al. Evapotranspiracao da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas: Coeficiente da Cultura" Dual" Padrão boletim FAO-56. **STAB**. v. 25, n. 5, p. 44-51, 2007.
- LUKES, P.; STENBERG, P.; RAUTIAINEN, M. Relationship between forest density and albedo in the boreal zone. **Ecological Modelling**, v. 261, p. 74-79, 2013.
- MACHADO, E.C. et al. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. *Bragantia*, v. 44, n. 1, p. 229-238, 1985.

- MAUDER, M. et al. A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 169, p. 122-135, 2013.
- MEYERS, T.P.; HOLLINGER, S.E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, n. 1, p. 105-115, 2004
- MENDONÇA, J. C. et al. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 5, p. 471-475, 2007.
- MONTEITH, J. L.; SZEICZ, G. The radiation balance of bare soil and vegetation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 87, n. 372, p. 159-170, 1961.
- NASSIF, D.S.P; MARIN, F.R.; COSTA, L.G. Evapotranspiration and transpiration coupling to the atmosphere of sugarcane in Southern Brazil: Scaling up from leaf to field. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 250-254, 2014.
- OGUNTUNDE, P.G.; GIESEN, N. Crop growth and development effects on surface albedo for maize and cowpea fields in Ghana, West Africa. **International Journal of Biometeorology**, v. 19, n. 2, p.106-112, 2004.
- OGUNTUNDE, P.G.; AJAKI, A.E.; GIESEN, N. Tillage and surface moisture effects on bare-soil albedo of a tropical loamy sand. **Soil & Tillage Research**, v. 85, p. 107-114, 2006.
- OLIVEIRA, E.C.A et al. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.
- OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 21, n. 4, p. 595-598, 1982.
- ONCLEY, S.P. et al. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. **Boundary Layer Meteorology**, v. 128, p. 1-28.
- PAÇO, T. A. et al. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance measurements. **Irrigation Science**, v. 30, n. 2, p. 115-126, 2012.
- PARENT, A.C.; ANCTIL, F. Quantifying evapotranspiration of a rainfed potato crop in South-eastern Canada using eddy covariance techniques. **Agricultural Water Management**, v. 113, p. 45-56, 2012.
- PAYERO, J.O.; IRMAK, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 31-43, 2013.
- PEREIRA, L.S. et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTÍNEZ-COB, A. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 1, p. 25-37, 2008.

\_\_\_\_\_. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, n. 3, p. 141-150, 1999.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

QURESHI, S. A.; MADRAMOOTOO, C. A.; DODDS, G. T. Evaluation of irrigation schemes for sugarcane in Sindh, Pakistan, using SWAP93. **Agricultural Water Management**, v. 54, n. 1, p. 37-48, 2002.

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 125-153, 2000.

REYNOLDS, O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A**, p. 123-164, 1895.

RUSSELLE, M. P. et al. Growth analysis based on degree days. **Crop Science**, v. 24, n. 1, p. 28-32, 1984.

SÁNCHEZ, J. M. et al. Estimating energy balance fluxes above a boreal forest from radiometric temperature observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 6, p. 1037-1049, 2009.

SANTOS, M.A. **Balanco de radiação, energia e água em cana-de-açúcar na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas**. 2010. 57f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2, p. 291-303, 2005.

SKINNER, R. H.; ADLER, P.R. Carbon dioxide and water fluxes from switchgrass managed for bioenergy production. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 138, n. 3, p. 257-264, 2010.

SCHMIDT, M. et al. The carbon budget of a winter wheat field: An eddy covariance analysis of seasonal and inter-annual variability. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 165, p. 114-126, 2012.

SILVA, T.G.F. et al. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 139-147, 2011.

\_\_\_\_\_. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 64-71, 2012.

\_\_\_\_\_. Índices Morfofisiológicos e Uso de Radiação Solar por um Cultivo de cana-de-açúcar Irrigada no Semiárido. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 764-773, 2014.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v. 98, n. 2, p. 91-97, 2006.

SMITH, P. et al. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 139, n. 3, p. 302-315, 2010.

SOUZA, J.L.; ESCOBEDO, J.F.; TORNERO, M.T.T. Albedo e estimativas do saldo de radiação em feijão-vagem sob cobertura de plástico e ambiente externo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 10, p. 1763-1774, 1999.

\_\_\_\_\_.; NICÁCIO, R.M.; MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, p. 1203-1220, 2005.

\_\_\_\_\_. et al. **Umidade do solo em cultivo de feijão com refletômetro de conteúdo de água sob variações de cobertura do solo e de irrigação**. In: XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2006, João Pessoa. Anais... João Pessoa, agosto de 2006.

SOUZA FILHO, J.D.C. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 318-330, 2006.

SOUZA LIMA, J.R. et al. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C. Maize canopies under two soil water regimes.: I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, n. 3, p. 169-184, 1998.

STEINWAND, A. L.; HARRINGTON, R. F.; OR, D. Water balance for Great Basin phreatophytes derived from eddy covariance, soil water, and water table measurements. **Journal of Hydrology**, v. 329, n. 3, p. 595-605, 2006.

\_\_\_\_\_. et al. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, n. 3, p. 180-190, 2005.

\_\_\_\_\_.; VERMA, S.B. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 1, p. 1-13, 2004.

\_\_\_\_\_.; VERMA, S.B. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems over 8 years. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 165, p. 12-24, 2012.

- SWINBANK, W.C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal of Meteorology**, v. 8, n. 3, p. 135-145, 1951.
- TEI, F.; AIKMAN, D.P.; SCAIFE, A. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth modelling. **Annals of Botany**, v. 78, p. 645-652, 1996.
- THOM, A.S. Momentum, mass and heat exchange of vegetation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 98, p. 124-134, 1972.
- THORNLEY, J.H.M.. **Mathematical models in plant physiology**. Academic Press (Inc.) London, Ltd., 1976.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. **Publications in Climatology**, v. 8, n. 1.
- TWINE, T.E. et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p.279-300, 2000.
- UNLAND, H. E. et al. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, n. 1, p. 119-153, 1996.
- WAGLE, P.; KAKANI, V. G.. Environmental control of daytime net ecosystem exchange of carbon dioxide in switchgrass. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 186, p. 170-177, 2014.
- WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 447, p. 85-100, 1980.
- WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.
- WILSON, K. B. et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, n. 2, p. 153-168, 2001.
- \_\_\_\_\_. et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1, p. 223-243, 2002.
- WOLF, A. et al. Effects of different eddy covariance correction schemes on energy balance closure and comparisons with the modified Bowen ratio system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 6, p. 942-952, 2008.
- XU, L.; BALDOCCHI, D.D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 123, n. 1, p. 79-96, 2004.
- ZHAO, F.H. et al. Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 93, n. 3, p. 99-108, 2007.

ZHAO, W.; LIU, B.; ZHANG, Z. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. **Agricultural water management**, v. 97, n. 2, p. 215-223, 2010.