

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CRESCIMENTO, EFICIÊNCIA NO USO DA RADIAÇÃO E
ENERGIA DE BIOMASSA EM CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA**

RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Junho – 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CRESCIMENTO, EFICIÊNCIA NO USO DA RADIAÇÃO E
ENERGIA DE BIOMASSA EM CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA**

RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Escobedo

Co-orientador: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Junho – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

F383c Ferreira Junior, Ricardo Araújo, 1981-
Crescimento, eficiência no uso da radiação e energia de
biomassa em cana-de-açúcar irrigada / Ricardo Araújo
Ferreira Junior. - Botucatu : [s.n.], 2013
xiv, 72 f. : ils. color., grafs., tabs., fots. color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013
Orientador: João Francisco Escobedo
Coorientador: José Leonaldo de Souza
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Irrigação. 2. Cana-de-açúcar - Cultivo. 3. Radiação solar. 4. Biomassa. 5. Cultivos agrícolas energéticos. I. Escobedo, João Francisco. II. Souza, José Leonaldo de. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: “CRESCIMENTO, EFICIÊNCIA NO USO DA RADIAÇÃO E ENERGIA
DE BIOMASSA EM CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA”**

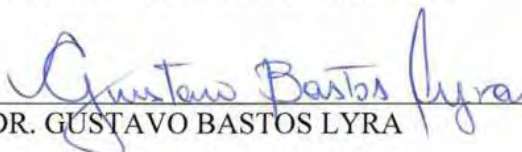
ALUNO: RICARDO ARAÚJO FERREIRA JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

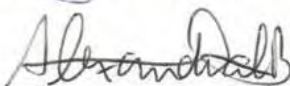
Aprovado pela Comissão Examinadora



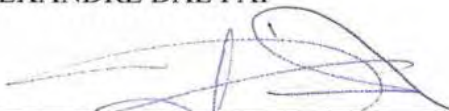
PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO



PROF. DR. GUSTAVO BASTOS LYRA



PROF. DR. ALEXANDRE DAL PAI



PROF. DR. DINIVAL MARTINS



PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ

Data da Realização: 28 de junho de 2013

BIOGRAFIA DO AUTOR

RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR, filho de Ricardo Araujo Ferreira e de Denise Monteiro de Carvalho, nasceu em Maceió, Alagoas, em 21 de outubro de 1981.

Graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, em dezembro de 2007, com a orientação do Professor Doutor José Leonaldo de Souza.

Em fevereiro de 2010 concluiu o mestrado em Agronomia (Área de Concentração Produção Vegetal), com a orientação do Professor Doutor José Leonaldo de Souza, na Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL.

Em junho de 2013 defendeu essa tese de doutorado em Agronomia (Programa Energia na Agricultura) na Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Botucatu.

OFERECIMENTO

À toda minha família e amigos, em especial à minha mãe (Denise Monteiro de Carvalho), à minha esposa (Piettra Moura Galvão Pereira) e à minha filha (Clara Moura Galvão Ferreira).

“Olho por olho, e o Mundo acabará cego.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. José Leonaldo de Souza, pelos ensinamentos científicos e moral ao longo de minha formação acadêmica;

Ao professor Dr. João Francisco Escobedo pelo apoio e confiança.

Ao professor Dr. Iêdo Teodoro pelas sugestões e contribuições nas práticas agronômicas.

Aos colegas dos Laboratórios de Irrigação e Agrometeorologia da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) pelo empenho das atividades de campo, especialmente para Mauricio Prado e Renato Américo.

Aos colegas de disciplinas no doutorado pelo companheirismo, em especial a Daniel Viais, Ricardo Cervi, Ricardo Nakamura, Juliano Verri, Marcelo Hiroshi, Paulo, Diogo e Wendel;

Ao Professor Geraldo Veríssimo em nome do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar (PMGCA) da UFAL, pelo apoio ao Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar.

À todos os funcionários do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da UFAL que contribuíram para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Biocombustíveis e Energia (LABEN) da UFAL, por disponibilizar as análises do conteúdo energético da cana-de-açúcar.

À Usina Santa Clotilde, localizada em Rio Largo – AL, por disponibilizar as análises das variáveis agroindustriais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- Faculdade de Ciências Agronômicas e ao Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura pela oportunidade de aprendizado.

Ao Departamento de Ciências Ambientais, em especial aos componentes do Laboratório de Radiação Solar (Escobedo, Alexandre, Enzo, Erico, Thiago, Douglas).

Muito Grato!

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 Cultura da cana-de-açúcar	7
4.2 Espaçamentos entrelinhas de plantio (EEP)	9
4.3 Área Foliar	11
4.3.1 Métodos de determinação da área foliar	12
4.4 Balanço de radiação nas plantas	13
4.5 Eficiência do Uso da Radiação e Eficiência de Conversão de Energia.....	16
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
5.1 Área Experimental e Manejo Agrônomico.....	20
5.2 Medidas Ambientais	25
5.2.1 Evapotranspiração	26
5.2.2 Balanço hídrico.....	28
5.2.3 Graus-dia	29
5.3 Medidas de Crescimento	29
5.3.1 Medidas Biométricas	29
5.3.2 Medidas de Fitomassa	31
5.4 Calor Específico de Combustão	32
5.5 Medidas Radiométricas	33
5.5.1 Coeficiente de Extinção da Luz.....	35
5.6 Cobertura do Solo	35
5.7 Eficiência do Uso da Radiação (EUR)	36
5.8 Eficiência de Conversão de Energia (ECE).....	36
5.9 Variáveis de produção	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1 Medidas Ambientais	38
6.2 Medidas de Crescimento	44
6.2.1 Fator de Forma	44
6.2.2 Variáveis de Crescimento.....	45
6.3 Coeficiente de Extinção.....	49
6.4 Cobertura do Solo.....	53
6.5 Matéria Seca e Irradiação Interceptada	56
6.6 Eficiência do Uso da Radiação e Energia.....	60
7 CONCLUSÕES	64
8 REFERÊNCIAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução da área cultivada e produtividade da cultura de cana-de-açúcar no Mundo (adaptado de Steduto et al., 2012).	8
Figura 2. Relação da área sombreada por uma folha sobre o solo (a) e área de uma folha (af) em função da direção dos raios de luz e da orientação da folha (adaptado de Teh, 2006).	15
Figura 3. Representação de uma análise de crescimento em função da quantidade de radiação interceptada por uma cultura (adaptado de Monteith, 1977).	17
Figura 4. Efeito da temperatura do ar e da concentração do CO ₂ sobre a eficiência de conversão de energia em mecanismos fotossintéticos do tipo C3 e C4 (adaptado de Zhu et al., 2008).	19
Figura 5. Localização da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas localizado no município de Rio Largo, Alagoas.	20
Figura 6. Normais Climatológicas: A) umidade relativa (UR, %), temperatura do ar média (Tm, °C); B) fração de nebulosidade (FN, %) e total de precipitação (P, mm) em Rio Largo-Alagoas, período de 1972 a 2010.	21
Figura 7. Esquema dos dois tipos de espaçamentos entrelinhas e posicionamento dos tubos de gotejo: A) espaçamento único (1 m); B) espaçamento combinado (1,4 e 0,6 m).	24
Figura 8. Vista aérea do cultivo de cana-de-açúcar com dois tipos de espaçamentos entrelinhas: espaçamento combinado (esquerda) e espaçamento único (direita).	25
Figura 9. Estação agrometeorológica automática da Unidade Acadêmica do Centro de Ciência Agrária.	26
Figura 10. Regressão linear entre o saldo de radiação diário (Rn) e a irradiação solar global (Hg) medições sobre o cultivo da grama em condições padrões, realizadas no período de janeiro a setembro de 2006.	27
Figura 11. Numeração das folhas pelo sistema de Kuijper (adaptado de Van Dillewijn, 1952).	30
Figura 12. Amostragem de cana-de-açúcar com componentes separados (folhas verdes e secas, colmos e ponteiros).	32

Figura 13. Regressão linear entre irradiância solar fotossintética (R_f) e a irradiância solar global (R_g), para a região de estudo, medidos com sensor Quantum (LI-190SA, <i>Li-COR</i>) e piranômetro CMP21(Kipp & Zonen), respectivamente.....	34
Figura 14. Sensores utilizados para medidas da irradiância solar fotossintética transmitida pelo dossel de cana-de-açúcar.....	35
Figura 15. Principais elementos meteorológicos diários: A) temperatura do ar média (T_m , °C) e umidade do ar relativa média (UR_m , %); B) precipitação (P , mm), irrigação (I , mm) e irradiação solar global (H_g , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$). DAP = dias após o plantio.	39
Figura 16. Evapotranspiração de referência (E_{To}), da cultura (E_{Tc}), real (E_{Tr}) e coeficiente da cultura (K_c) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado.....	41
Figura 17. Déficit (Def) e excesso hídrico (Exc) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado.	43
Figura 18. Relação entre medidas da área foliar (AF) através do integrador de área (LI-3100C) e da área oriunda do produto do comprimento (C) pela largura máxima (L) das mesmas folhas de cana-de-açúcar, variedade RB98710.....	45
Figura 19. Relação entre o índice de área foliar (IAF) e os graus-dia acumulados (GDA) ($T_b = 10\ ^\circ C$) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado.....	46
Figura 20. Número de plantas por metro quadrado ($plantas\ m^{-2}$), altura do dossel ($alt.$ dossel) e comprimento dos colmos em funções dos graus-dia acumulados (GDA) ($T_b = 16\ ^\circ C$) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado...	48
Figura 21. Relação entre o negativo do logaritmo natural da fração da irradiância solar fotossintética transmitida ($-\ln(fR_f_T)$) e o índice de área foliar (IAF) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado.	52
Figura 22. Estimada da cobertura do solo (CS) média dos dois espaçamentos entrelinhas de plantio (único e combinado) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada.	53

- Figura 23. Relação entre a cobertura do solo e o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado. 55
- Figura 24. Massa da matéria seca (MS) e irradiação solar fotossintética interceptada (H_f_int) acumuladas em função dos dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado. 57
- Figura 25. Massa da matéria seca (MS) dos colmos em função da massa da MS total (preto) e teor de água na matéria fresca dos colmos (MF colmos) em função dos dias após o plantio (DAP) (azul) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado. 59
- Figura 26. Relação entre a massa da matéria seca (MS) da parte aérea (símbolos vazios inclui as folhas secas) e a irradiação solar fotossintética interceptada (H_f_int) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado. 61
- Figura 27. Irradiação solar global (H_g), irradiação solar fotossintética (H_f), irradiação solar fotossintética interceptada (H_f_int) e energia de fitomassa (E_{FM}) acumuladas e as eficiências de utilização de energia em função dos dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado. 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo da análise química das amostras de solo da área de campo onde foi realizada a pesquisa.....	22
Tabela 2. Comprimento das fases de desenvolvimento, coeficiente da cultura (Kc), evapotranspiração de referência (ET _o) e da cultura (ET _c) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: espaçamento simples e espaçamento combinado.	42
Tabela 3. Coeficientes das equações (Boltzmann) das relações entre número de plantas por metro quadrado (plantas m ⁻²), altura do dossel (alt. dossel), comprimento dos colmos (c. colmos) versus os graus-dia acumulados (temperatura base = 16 °C) na cultura da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: espaçamento simples e espaçamento combinado.	49
Tabela 4. Índice de área foliar (IAF), fração da irradiância fotossintética transmitida (fR _{f_T}) e o coeficiente de extinção da luz (k) ao decorrer dos dias após o plantio (DAP) da cultura de cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: espaçamento simples e espaçamento combinado.....	50

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área do solo ocupada pela planta em questão
a	Área do solo sombreada pela folha
A1	Coeficiente do modelo Boltzmann
A2	Coeficiente do modelo Boltzmann
AB	Segmento de reta
AF	Área das folhas
AL	Alagoas
Al	Alumínio
AS	Área útil da superfície do solo
B	Máximo acúmulo de matéria seca
C	Comprimento da folha +3
C.T.C	Capacidade de troca catiônica
Ca	Cálcio
CAD	Capacidade de água disponível
CECA	Centro de Ciências Agrárias
CO ₂	Dióxido de carbono
CS	Cobertura do solo
Cu	Cobre
DAP	Dias após o plantio
Def	Déficit hídrico
dx	Coeficiente do modelo Boltzmann
EEP	Espaçamento entrelinhas de plantio
E _{FM}	Energia de fitomassa
e _s	Pressão de saturação do vapor d'água do ar
ET _c	Evapotranspiração da cultura
ET _o	Evapotranspiração de referência
ECE	Eficiência de conversão de energia
EUR	Eficiência do uso da radiação
Exc	Excesso hídrico
Exp	Exponencial
F1	Fase de crescimento inicial
F2	Fase de desenvolvimento

F3	Fase média
F4	Fase final
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
Fe	Ferro
Ff	Fator de forma para as dimensões foliares
FN	Fração de nebulosidade
fRf_int	Fração da irradiância fotossintética interceptada
fRf_T	Fração da irradiância fotossintética transmitida
G	Fluxo de calor no solo
GD	Graus-dia
GDA	Graus-dia acumulados
Hf	Irradiação fotossintética
Hf_int	Irradiação fotossintética interceptada
Hg	Irradiação solar global
I	Irrigação
IAF	Índice de área foliar
k	Coeficiente de extinção da luz
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
Kc	Coeficiente de cultura
L	Largura máxima da folha +3
Ln	Logaritmo natural
M.O.	Matéria orgânica
meq	Miliequivalente
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MS	Matéria seca
N	Nitrogênio
n	Número de dias observados
Na	Sódio
nfv	Números de folhas verdes expandidas
NPML	Número de plantas por metro linear
P	Precipitação

P_2O_5	Pentóxido de fósforo
PAR	<i>Photonsynthetically active radiation</i>
pH	Potencial hidrogênio iônico
PMGCA	Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar
ppm	Parte por milhão
R^2	Coeficiente de determinação
R_f	Irradiância solar fotossintética incidente
R_{f_T}	Irradiância solar fotossintética transmitida
R_g	Irradiância solar global
RIDESA	Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético
R_n	Saldo de radiação
RUE	<i>Radiation use efficiency</i>
T_b	Temperatura base
T_m	Temperatura do ar média
T_n	Temperatura do ar mínima
T_x	Temperatura do ar máxima
u_2	Velocidade do vento a 2 m
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UR	Umidade relativa
UR_m	Umidade relativa do ar média
W	Watt
w_1	Coeficiente do modelo Log-Normal
w_2	Coeficiente do modelo Log-Normal
w_3	Coeficiente do modelo Log-Normal
X_o	Coeficiente do modelo Boltzmann
Zn	Zinco
λ	Comprimento de onda
Δ	Inclinação da curva da pressão de vapor saturado versus temperatura
β_0	Intercepto (coeficiente linear)
β_1	Inclinação (coeficiente angular)
γ	Coeficiente psicrométrico
% V	Saturação por base

1 RESUMO

A radiação solar é fonte de energia primaria para a produção de fitomassa. Sendo a energia solar uma fonte renovável, a fitomassa é de grande interesse no cenário energético mundial, especialmente para a produção de combustíveis (biocombustível) e pela geração de eletricidade através de sua combustão. A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) tem vantagens (tecnológicas e culturais) em relação às demais culturas, quando se refere a produção de energia primaria no Brasil. Assim, desenvolvimento de tecnologias no setor sucroenergético da cana-de-açúcar tem avançado em busca de melhorias de produtividade e rentabilidade. Nesse contexto, e considerando escassez de informações para a cultura da cana-de-açúcar em relação ao balanço de radiação, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o crescimento e seu ambiente físico de cultivo, para determinar a eficiência na qual a radiação solar é convertida em fitomassa pelo cultivo de cana-de-açúcar irrigada na região de Rio Largo – Alagoas em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. Para tanto, a variedade RB98710 foi cultivada na área experimental da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas. A área foi dividida em duas parcelas (com 12 fileiras de plantio por parcela), sendo uma com espaçamento único (1 m) e a outra com espaçamento combinado (0,6 e 1,4 m). O cultivo foi irrigado por um sistema de gotejamento superficial. Medidas biométricas e solarimétricas foram realizadas para avaliar o crescimento das plantas e o balanço de radiação dentro do dossel. O coeficiente de extinção (k) da luz foi determinado por uma relação entre a fração da irradiação fotossintética transmitida e o índice de área foliar. A eficiência do uso da radiação (EUR) foi determinada através de regressão linear, forçada a passagem pela origem, entre a matéria seca (MS) acumulada da parte aérea e a irradiação

fotosintética acumulada no ciclo de cultivo. A eficiência de conversão de energia (ECE) foi calculada pela razão entre a energia armazenada na fitomassa acumulada (E_{FM} , $J\ m^{-2}$) e a irradiação solar global acumulada no mesmo período. A E_{FM} foi determinada multiplicando-se a MS acumulada pelo calor específico de combustão, utilizando-se medidas calorimétricas. Nas plantas com espaçamento único o valor de k foi igual a 0,48 ($\pm 0,03$) e o valor com espaçamento combinado foi 0,51 ($\pm 0,02$), valores semelhantes estatisticamente, o que indicou que a interceptação da luz pelo dossel não foi fortemente influenciada pela configuração de plantio. A EUR das plantas de cana-de-açúcar foi de $2,73\ g\ MJ^{-1}$ ($\pm 0,09$) no espaçamento único e $2,78\ g\ MJ^{-1}$ ($\pm 0,25$) no espaçamento combinado. O calor específico de combustão médio das diferentes partes da planta de cana-de-açúcar foi igual a $16.300\ J\ g^{-1}$ de matéria seca, já o valor referente à matéria seca apenas dos colmos foi igual a $15.600\ J\ g^{-1}$. Assim, os valores de ECE resultam em 4,4 e 4,5 %, respectivamente para os cultivos com espaçamento único e combinados.

Palavras-chave: coeficiente de extinção da luz, eficiência do uso da radiação, espaçamento entrelinhas de plantio, eficiência de conversão de energia, calor específico de combustão.

GROWTH, RADIATION USE EFFICIENCY AND BIOMASS ENERGY IN SUGARCANE IRRIGATED. Botucatu, 2013. 72p.

Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR

Adviser: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

Co-adviser: JOSÉ LEONALDO DE SOUZA

2 SUMMARY

Solar radiation is primary energy source for biomass production. Being solar energy a renewable source, the phytomass is of great interest in the world energy scene, especially for the production of fuels (biofuels) and the electricity generation through combustion. The sugarcane crop (*Saccharum* spp.) has advantages (technological and cultural) in relation to the other crops when it comes to production of primary energy in Brazil. Thus, the technologies development in the sugarcane energetic sector has advanced with the goal of improvement in productivity and profitability. In this context and considering the lack of information for sugarcane crop in relation to the radiation balance, the aim of the present study was to assess the growth and its physical environment to determine the efficiency at which the solar radiation is converted into biomass by irrigated sugarcane crop in the region of Rio Largo – Alagoas in two row spacings planting. For this, the variety RB98710 was cultivated in experimental area of the Academic Unit Centro de Ciências Agrárias of Universidade Federal de Alagoas. The area was divided into two plots (with 12 rows of plants per plot) one with single spacing (1 m) and the other with combined spacing (0.6 and 1.4 m). The crop was irrigated by a superficial drip irrigation system. Biometric and solarimetric measurements were performed to evaluate plant growth and the radiation balance inside the canopy. The extinction coefficient (k) of the light was determined by a relationship between the fraction of photosynthetic irradiation transmission and leaf area index. The radiation use efficiency (RUE) was determinate by linear regression, forced to pass through the origin, between shoot dry matter (DM) accumulation and photosynthetic irradiation accumulation in the crop cycle. The energy conversion efficiency (ECE) was calculated by the ratio between

the energy stored in phytomass accumulated (E_{PM} J m⁻²) and global solar irradiation accumulated in the same period. The E_{PM} was determined by multiplying the accumulated MS and the specific heat of combustion. The latter was measured using a calorimeter. In plants with single spacing value of k was equal to 0.48 ($\pm 0,03$) and the value combined spacing was 0.51 ($\pm 0,02$), statistically similar values, indicating that light interception by the canopy not been strongly influenced by the type of planting set. The RUE of plants sugarcane was 2.73 g MJ⁻¹ ($\pm 0,09$) in single spacing and 2.78 g MJ⁻¹ ($\pm 0,25$) in the combined spacing. The average specific heat of combustion of different plant parts of sugarcane was equal to 16,300 J g⁻¹ of dry matter, since the value for the dry matter of the stalks was equal to 15,600 J g⁻¹. Thus, the values of ECE result in 4.4 and 4.5 %, respectively for crops with single spacing and combined.

Keywords: extinction coefficient of light, radiation use efficiency, row spacing, energy conversion efficiency, specific heat of combustion

3 INTRODUÇÃO

A fitomassa é a denominação para biomassa autoproduzida pelos vegetais, ou seja, é a massa dos vegetais de uma área geográfica conhecida. Essa produção de massa ocorre através do processo fotossintético e, tem como fonte primaria de energia a radiação solar, que juntamente com a utilização de moléculas de água, fixam o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera para consequente produção de carboidratos. A energia radiante usada na fotossíntese é uma componente da radiação solar global [comprimentos de ondas (λ) entre 300 a 2800 nanômetros (nm)], que na faixa do espectro visível solar (390-770 nm) (IQBAL, 1983), está entre os λ de 400-700nm e é denominada de radiação fotossinteticamente ativa ou pela sigla PAR da escrita inglesa *Photonsynthetically Active Radiation*. Como a radiação solar é uma fonte de energia renovável, a fitomassa, atualmente, tem grande interesse no cenário energético mundial, destacando-se pela produção de combustíveis (biocombustível) e pela geração de eletricidade através de sua combustão. No Brasil, para o ano de 2011 a biomassa (inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações) representou 6,6% da oferta interna de eletricidade. Porém, tratando-se da produção de energia primaria nacional, a biomassa correspondeu a 27,2% (16,9% de produtos da cana-de-açúcar e 10,3% de lenha) (BEN, 2012).

Dentre as culturas agrícolas com importância no setor energético nacional, a cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) tem reconhecidas vantagens em relação às demais, devido a canavieira ser uma atividade tradicional em diversas partes do território brasileiro, e a partir da matéria-prima produz açúcar (alimento) e etanol (combustível) com tecnologia avançada e fácil distribuição para o mercado consumidor. A cana-de-açúcar é fonte de cerca de 75 % do açúcar para consumo humano no Mundo

(SOUZA et al., 2008). No Brasil aproximadamente 40 % da cana é usada para produção de etanol (STEDUTO et al., 2012). Além dos produtos citados anteriormente, a geração de energia elétrica pela indústria canavieira, através da queima do bagaço e das palhas que restam após a colheita da cultura, é uma realidade. Num futuro próximo, todas as usinas sucroenergéticas serão fornecedoras de eletricidade para a rede pública. Assim, o desenvolvimento de tecnologias no setor agrícola da cana-de-açúcar avança em busca de melhorias de produtividade (produção por área) e rentabilidade.

Nesse sentido, o espaçamento entrelinhas de plantio (EEP) é um fator em adequação no cultivo de cana-de-açúcar, pois práticas com a irrigação por gotejamento e a colheita mecanizada sugerem espaçamentos alternativos. Assim, o estudo do balanço de radiação solar no dossel vegetativo (camada vegetal com específica arquitetura de galhos e folhas) nesses diferentes manejos agrícolas é fundamental para o entendimento dos processos de crescimento e desenvolvimento da cultura (SINCLAIR; MUCHOW, 1999) e para aplicação de modelos, que utilizam algumas componentes desse balanço como variável de entrada (INMAN-BAMBER, 1991; KEATING et al., 1999; LIU; BULL, 2001). A radiação solar interceptada (ou absorvida) pelo dossel das plantas é a componente mais importante para uma análise de crescimento, porém para estimá-la através da radiação solar que chega ao topo das plantas (radiação incidente) é necessário conhecer o índice de área foliar [IAF - razão entre a área das folhas (AF) verdes da planta e a área útil da superfície do solo (AS)] e o coeficiente de extinção da luz (k) - que expressa a influência das propriedades óticas das folhas e da geometria do dossel na atenuação da luz (VARLET-GRANCHER et al., 1989). Nesse contexto e considerando a escassez de informações para a cultura da cana-de-açúcar, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o crescimento e seu ambiente físico de cultivo, para determinar a eficiência na qual a cultura da cana-de-açúcar, cultivada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio, converte a radiação solar em fitomassa, na região de Rio Largo - Alagoas. Especificamente objetivou-se determinar: 1) o fator de forma para a folha da variedade RB98710 de cana-de-açúcar; 2) o crescimento das plantas em função dos variáveis meteorológicas; 3) o coeficiente extinção da luz; 4) a fração de cobertura do solo; 5) a eficiência do uso da radiação; 6) a energia da fitomassa; 7) a eficiência do uso da energia.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é pertencente à família botânica da *Poaceae*. Atualmente as variedades comerciais de cana-de-açúcar são híbridos complexos (spp.) derivados de espécies do gênero *Saccharum*, nativas do Sudeste Asiático (STEDUTO et al., 2012). Nesse gênero ocorrem as espécies: *S. officinarum* L., *S. spontaneum* L., *S. sinensis* Roxb. e *S. barben* Jew, *S. robustum* Jew. e *S. edule* Hask (ALMEIDA et al., 1995). Análises detalhadas de vários registros indicaram que a cana-de-açúcar foi trazida da Oceania, mais provavelmente na Nova Guiné. Vários tipos de cana de colmos grossos foram achados em jardins de nativos desse País (ARTSCHWAGER et al., 1958; BISWAS, 1988). A cultura da cana-de-açúcar chegou à Espanha aproximadamente no ano 600 D.C. e de lá se difundiu para os outros Países europeus. No Brasil, a cultura foi introduzida em torno de 1500, pelos Portugueses, e no ano de 1526, ocorria exportação de açúcar de cana-de-açúcar para Lisboa (BISWAS, 1988).

Atualmente, a cana-de-açúcar é cultivada em 100 países, em regiões tropicais e subtropicais do Mundo. No ano de 2008, 17 países produziram mais de 10 milhões de toneladas de colmos industrializáveis frescos. A produção total em 2009 foi de 1 bilhão e 661 milhões de toneladas, em 24 milhões de hectares (Figura 1), o que resultou em produtividade média global de 69,8 toneladas de cana por hectare por ano (STEDUTO et al., 2012). Nesse ano, o Brasil foi o maior produtor mundial de cana (671 milhões de toneladas), seguido pela Índia (285 milhões de toneladas), China (116 milhões

de toneladas), Tailândia (66 milhões de toneladas) e Paquistão (50 milhões de toneladas). O Egito foi o país com maior produtividade média (121 t ha^{-1}).

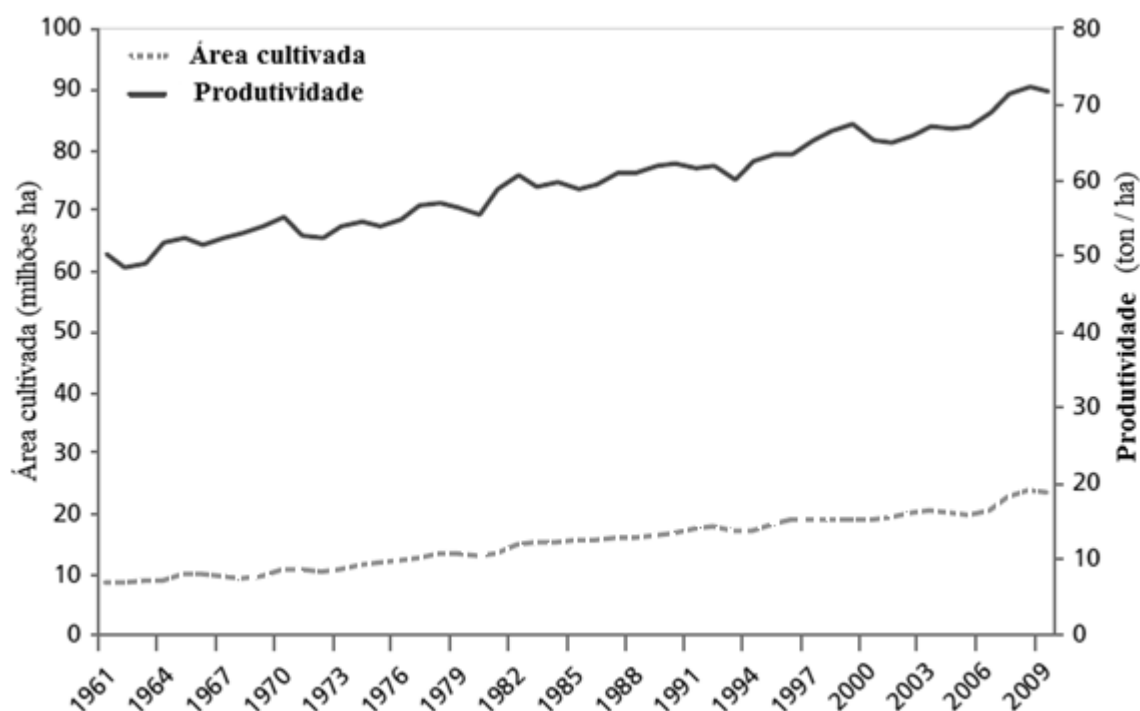


Figura 1. Evolução da área cultivada e produtividade da cultura de cana-de-açúcar no Mundo (adaptado de Steduto et al., 2012).

Segundo dados do levantamento feito pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012), o Brasil tem produtividade média estimada no ano de 2012 (safra 2012-2013) de aproximadamente 69,8 toneladas por hectare com uma produção de 595,13 milhões de toneladas. No estado de Alagoas, na mesma safra, a produção de colmos industrializados foi cerca de 23,6 milhões de toneladas. Apesar dessa produção representar menos que 4,5% da produção nacional, Alagoas foi o sétimo maior produtor do País. Os seis primeiros foram: São Paulo (~55%), Goiás (~8,9%), Minas Gerais (~8,8%), Paraná (~6,9%), Mato Grosso do Sul (~6,2%) e Rio Grande do Sul (~5,5%).

A planta de cana-de-açúcar desenvolve-se sob a forma de touceiras. A parte aérea é formada por colmos, folhas e por estruturas reprodutoras (inflorescência e sementes). Todavia, o florescimento em cultivos comerciais é um fenômeno indesejado ao produtor, pois o crescimento e a qualidade dos colmos são prejudicados. O colmo é segmentado por nós e entrenós (ou internódios), sendo os comprimentos desses últimos regulados pelas condições meteorológicas. Os entrenós imaturos (localizados na região do

colmo com folhas verdes) são fibrosos, com baixa concentração de sacarose. Com o amadurecimento do colmo o crescimento diminui e o acúmulo de sacarose aumenta geralmente influenciado por restrição meteorológica (hídricas e térmicas).

A cana-de-açúcar é uma espécie com metabolismo de fixação de carbono do tipo C4. Essa denominação é devido ao CO₂ ser captado por uma enzima especializada (Fosfoenolpiruvato carboxilase - PEPcase), que forma um composto de quatro carbonos (malato ou aspartato). Nesse tipo de planta C4, a concentração de CO₂ é maior, pois a enzima PEPcase não tem afinidade com o O₂ atmosférico, assim a planta não sofre o efeito negativo, em termo energético, do processo chamado de fotorespiração – assimilação de O₂ ao invés de CO₂ pela enzima Rubisco, que ocorre em plantas de metabolismo C3. Com essa maior concentração de CO₂ a planta controla melhor a abertura dos estômatos, e, como um dos grandes problemas das plantas, especialmente as cultivadas em região áridas e semiáridas, é conviver com a dualidade da conservação de água e da assimilação de CO₂ através dos poros estomáticos, as culturas com esse tipo de mecanismo de fixação de CO₂ apresentam maior eficiência fotossintética, e consequentemente, alta produção de fitomassa. Embora as plantas do tipo C4, em relação ao número de espécies, sejam relativamente inferiores quando comparadas com as plantas C3 (aproximadamente 7.500 espécies C4 para cerca de 250.000 espécies C3), são responsáveis por cerca de um quarto da produtividade primária do planeta (SAGE; ZHU, 2011).

4.2 Espaçamentos entrelinhas de plantio (EEP)

O EEP é um fator com grande influência na produção final de qualquer cultura agrícola. Teoricamente, o plantio de culturas com menores EEP melhora o rendimento agrícola de uma determinada área, uma vez que permite que o cultivo explore com mais eficiência os recursos ambientais (luz, água e nutrientes) e ainda possibilita menor competição com as plantas daninhas (HOZAYN et al., 2012), diminuindo a necessidade do controle (químico e/ou mecânico) das mesmas. De uma forma geral, quanto menor for o EEP mais rápido se dará a cobertura do solo pelo fechamento vegetal. Como resultado desse aspecto tem-se a diminuição da evaporação da superfície com consequente aumento do armazenamento de água no solo para planta (EBERBACH; PALA, 2005), aumento da interceptação da radiação solar pelas folhas, e, consequentemente, maior

fotossíntese, e maximização da exploração de nutriente pela maior distribuição de plantas na área.

Na cultura da cana-de-açúcar, a redução da distância entre sulcos de plantio resulta em ganhos de produtividade. Inúmeros trabalhos (OLIVIER; SINGELS, 2003; SINGELS; SMIT, 2009; MURARO et al., 2011) relatam esse aumento de produtividade com a redução do EEP. Um exemplo é a pesquisa realizada na África do Sul por Singels e Smit (2009), que comparando EEP variando de 0,3 a 3,0 m, concluíram que a diminuição do EEP afeta positivamente muitos aspectos de crescimento e desenvolvimento, tais como, número de perfilhos (brotos), radiação interceptada ou absorvida, densidade final de colmos, biomassa e produtividade de colmos. Todavia, o uso de espaçamentos menores nos cultivos comerciais acarretam maiores custos de operações. Logo, é preciso verificar se os menores EEP produzem acréscimos suficientes de produção para cobrir os custos associados às operações extras.

Atualmente, em cultivos de cana-de-açúcar, os espaçamentos dos sulcos de plantio são dependentes da forma de colheita (manual ou mecanizada) e do sistema de irrigação utilizado. Esses fatores sugerem que as filas de plantio alternem os espaçamentos com duas larguras, de modo que formem fileiras duplas com espaçamento menor, seguida de um espaçamento maior. Esse tipo de configuração de plantio é conhecido por espaçamento duplo, espaçamento combinado, espaçamento alternado e também espaçamento abacaxi - por ser muito comum a utilização em cultivos dessa cultura.

O EEP combinado foi primeiramente utilizado para aumentar o número de plantas por área, porém o objetivo na atualidade é reduzir os custos da colheita. Na colheita da cana-de-açúcar, uma única passada da colhedora realiza-se o corte de duas linhas de cana e evita-se que as colhedoras e os caminhões de transbordo (caminhão utilizado na transferência dos colmos de cana picada pela colhedora até o caminhão que transporta à indústria) “pisoteiem” as linhas de plantas, não acarretando danos à soqueira, que é essencial para preservar a rebrota (brotação da cana após o corte). As operações de colheita representam, atualmente, grande parte do custo de produção da cana-de-açúcar. A colheita mecânica da cana-de-açúcar tem crescido, e estudos apontam para vantagens financeiras na utilização deste tipo de sistema de colheita em relação ao manual. Rodrigues e Abi Saab (2007) observaram uma redução de 32,74% no custo da operação de colheita mecanizada de cana sem queima em relação à colheita manual de cana queimada no estado

do Paraná. Com isto, os produtores de cana-de-açúcar estão buscando um melhor ajuste da lavoura para a colhedora, com destaque aos ajustes do espaçamento entrelinhas de plantio. O EEP combinado na cultura de cana-de-açúcar também está relacionado com a utilização de sistema de irrigação por gotejamento, pois essa configuração de plantio possibilita economia de materiais necessários para o dimensionamento desse tipo de irrigação, uma vez que uma única fita gotejadora possibilita o fornecimento de água de duas linhas de plantas.

4.3 Área Foliar

As superfícies das folhas de uma planta são o local no qual ocorrem processos fundamentais para a produção dos carboidratos (fitoassimilados), tais como a transpiração e a fotossíntese. Assim sendo, existe interesse em se conhecer as dimensões do aparato foliar (área foliar) de determinada planta ou comunidade vegetal. O conhecimento da área foliar se faz necessário para determinação da transpiração, da radiação interceptada e transmitida, fotossíntese e, conseqüentemente, a produtividade da cultura. A área foliar de uma planta é influenciada por fatores do ambiente de crescimento, como a condição hídrica, a temperatura do ar e a fertilidade do solo, e pela própria variação genotípica. A diminuição da área foliar devida ao efeito do déficit hídrico é considerada a primeira linha de defesa das plantas. O estresse hídrico pela diminuição do armazenamento de água do solo tem como consequência: diminuição do tamanho de folhas, decréscimo do surgimento de novas folhas e aumento da abscisão foliar (FARIAS et al., 2008). Inman-Bamber e Smith (2005) relatam que as plantas evitam ou retardam o estresse hídrico, limitando a transpiração através do fechamento dos estômatos ou reduzindo a área da folha exposta ao ambiente propício a evaporação. Os mesmos autores mencionam que folhas jovens de cana-de-açúcar são capazes de se enrolarem para reduzir a área exposta e, portanto, reduzir a incidência de radiação solar.

A temperatura do ar tem muita influência na área foliar, expressa desde a germinação e emergência de plantas até o lançamento e senescência de folhas. Por exemplo, a temperatura do ambiente está fortemente relacionada com o tempo de aparecimento entre duas folhas consecutivas. Daí vem o conceito de filocrono, definido como o intervalo de tempo entre o aparecimento de duas folhas sucessivas, sendo que o tempo é mais adequado quando representado pelo sistema de unidades térmicas, tendo

como unidade graus-dia por folha ($^{\circ}\text{C dia folha}^{-1}$) (SINCLAIR et al., 2004; SILVA et al., 2012). O sistema de unidades térmicas (ou de calor) é um índice bioclimático, comumente chamado de graus-dia (GD). Esse mostra que o somatório do saldo entre a temperatura do ar média diárias e a temperatura base tem relação direta com o desenvolvimento vegetal. A temperatura base (ou de referência) é a temperatura limite para o crescimento vegetal, ou seja, abaixo da qual a planta apresenta crescimento nulo. Na literatura, diversos valores são citados de temperatura base para a cultura da cana-de-açúcar, utilizados para relacionar o desenvolvimento de diferentes partes da planta. Por exemplo, Bacchi e Souza (1977) usaram a temperatura base de 19°C relacionada com a altura do colmo. Já, Inman-Bamber (1995) utilizou uma temperatura basal de 10°C associada ao desenvolvimento do dossel. A temperatura base de 16°C foi determinado para a fenologia de número de colmos (perfilhos) em pesquisa realizado por Inman-Bamber (1994).

A condição nutricional é fundamental para o crescimento de uma cultura. De maneira geral, o nitrogênio tem destaque por ser o quarto elemento encontrado em termos quantitativos nas plantas, os três primeiros são: carbono (fixado do ar atmosférico), hidrogênio e oxigênio (oriundos da quebra da molécula da água). O nitrogênio atua na formação de aminoácidos, proteínas, composição da clorofila e promove o rápido crescimento vegetativo. Wiedenfeld e Enciso (2008) mostraram aumento do índice de área foliar (IAF) de cana-de-açúcar irrigada quando elevaram a dose de nitrogênio. Gimenez et al. (1994) demonstraram maior crescimento da parte aérea da planta de girassol em resposta de níveis de nitrogênio durante a fase vegetativa de girassol e relataram maior resposta à interceptação da radiação solar devido à expansão foliar.

4.3.1 Métodos de determinação da área foliar

Os métodos de determinação da área foliar podem ser classificados como diretos (destrutivos) e indiretos (não destrutivos). Os métodos diretos têm maior precisão, todavia exigem maior logística para aferição, além da necessidade de retirar as folhas da planta amostrada. Assim, por serem mais precisos, são usados para validação de métodos indiretos. Nos métodos diretos, após a coleta das folhas, a determinação da área foliar é feita ou por técnicas planimétricas (manual ou digital) ou gravimétricas. A técnica planimétrica baseia-se na relação entre a área foliar de uma folha e do número de unidades

de área cobertas pela mesma num plano horizontal de referência (planímetro). Já o método gravimétrico correlaciona a massa da matéria seca de folhas com a área foliar, ou seja, usa-se a massa foliar específica (razão entre a massa da matéria seca e a área foliar verde). Esse método é conveniente quando é preciso fazer amostragens de elevado número de folhas (JONCKHEERE et al., 2004).

Nos métodos indiretos (não destrutivos) a área foliar é inferida a partir de observações de outra variável. São métodos que por não serem destrutivos, possibilitam que as avaliações ocorram nas mesmas plantas no decorrer do ciclo, o que reduz a variabilidade das medidas associadas aos procedimentos de amostragens aleatórias (NESMITH, 1992). Também, são necessários para estudos de processos fisiológicos (transpiração e fotossíntese), e quando o número de plantas para estudo é limitado. Entre os métodos indiretos mais comumente usados, destacam-se: medidas das dimensões lineares (MONTGOMERY, 1911; FRANCIS et al., 1969; PEREIRA, 1987; MADDONNI; OTEGUI, 1996) e medidas ópticas (BRÉDA, 2003; JONCKHEERE et al., 2004). O método das dimensões lineares consiste na relação linear entre a área foliar e o produto do comprimento pela largura das folhas, resultando em um fator que permite a determinação da área da folha através dessas medidas lineares, denominado de fator de forma. Os métodos de medidas ópticas são baseados na transmissão da radiação solar através do dossel vegetativo que utiliza o princípio da Lei de Beer-Bouguer-Lambert (que na literatura é comumente citada apenas como Lei de Beer) para estimar o IAF. A Lei de Beer é frequentemente aplicada aos processos da física ambiental - descreve a atenuação de um feixe de radiação (comprimento de onda específico) ao atravessar um meio homogêneo com características específicas (MONTEITH, 1973). No caso da interação da radiação solar com o dossel vegetativo, o meio é o próprio dossel e suas características estruturais influenciam na atenuação da luz.

4.4 Balanço de radiação nas plantas

O fluxo de radiação solar que incide no dossel de uma comunidade vegetal, parte alcança a superfície do solo sem ser interceptada pelos diversos órgãos da planta, principalmente pelas folhas e outra parte é interceptada pela vegetação. Sem saber o fracionamento da radiação solar no dossel vegetativo, não é possível quantificar e nem

entender os mecanismos relacionados com o crescimento e o desenvolvimento de uma população de plantas. Do total de energia solar que incide numa superfície de vegetação natural (florestas nativas e campos naturais) ou cultivada (culturas e florestas agrícolas), a fração da radiação interceptada pelo dossel é decomposta em componentes: refletida e absorvida. A componente absorvida é a principal do balanço de radiação solar em planta, pois é a energia utilizada na fotossíntese, ou seja, aquela que é transformada em energia química (carboidratos). Sua determinação é necessária para modelagem de crescimento e avaliações de eficiência da conversão da energia radiante para a energia retida na fitomassa (MONTEITH, 1977). A radiação refletida tem grande aplicação em estudos de sensoriamento remoto, associados com manejo agrícola, pois fatores como deficiência nutricional e hídrica, idade, e doenças alteram as respostas espectrais das folhas (PINTER, Jr. et al., 2003). Já, a fração transmitida ao solo é fundamental para o processo de evaporação, assim sua determinação tem sido aplicada na partição da evapotranspiração em evaporação (água do solo) e transpiração (vegetal) (RITCHIE, 1972; EBERBACH; PALA, 2005).

Na literatura, pesquisadores (MONSI; SAEKI, 2005 - essa referência é uma tradução em Inglês do artigo original publicado em alemão em 1953; CAMPBELL; NORMAN, 1998; TEH, 2006) relataram que a probabilidade de interceptação da “luz” (radiação solar) por uma folha horizontal e disposta ao acaso em um dossel é a razão da área do solo sombreada pela folha (a) com a área do solo ocupada pela planta em questão (A). Assim, a probabilidade da radiação não ser interceptada por uma folha é igual a $(1-a/A)$. Considerando uma segunda folha com a mesma área foliar da primeira, e conseqüentemente a mesma área de sombreamento na superfície, a probabilidade que a “luz” não seja interceptada por nenhuma das folhas é igual a $(1-a/A)^2$. Então, um dossel com N número de folhas com áreas iguais, a probabilidade que a “luz” incidente penetre através do dossel sem interceptação nas folhas será de $(1-a/A)^N$. Para a maioria das plantas “ a ” é relativamente pequeno quando comparado a “ A ”, o que significa que $(1-a/A)^N$ é matematicamente semelhante a $\exp(-Na/A)$, onde Na/A é a definição do IAF.

A sombra (projeção na superfície) de uma folha posicionada na horizontal sempre terá área igual a sua própria área, independente da direção dos raios de incidência. Mas, quando a folha não se encontra na horizontal, sua sombra é diferente de sua área foliar, e pode ser menor ou maior dependendo da direção dos raios solares e do

ângulo foliar (Figura 2). Em dosséis reais, folhas ocupam varias orientações, logo a expressão $\exp(-IAF)$ é inadequada para descrever a fração de raios solares não interceptados. Essa deve ser modificada incluindo o índice denominado coeficiente de extinção da luz (k). Assim, a fração da radiação solar não interceptada é expressa como $\exp(-k IAF)$.

Segundo Park et al. (2005), os pesquisadores Monsi e Saeki (2005) foram os primeiros a sugerirem o uso da equação análoga a Lei de Beer para explicar a relação entre radiação transmitida pelo dossel de plantas e as propriedades físicas dessa cobertura. Nesse contexto, a radiação solar sofre, em geral, uma atenuação exponencial ao atravessar uma cobertura vegetal, essa função depende do tamanho (representada pelo IAF) e da estrutura do dossel (representada pelo k). Assim, a aplicação da Lei de Beer em dosséis resulta na expressão “radiação solar transmitida é igual à radiação solar incidente multiplicada pela exponencial do produto entre negativo do coeficiente de extinção da luz, e o índice de área foliar.

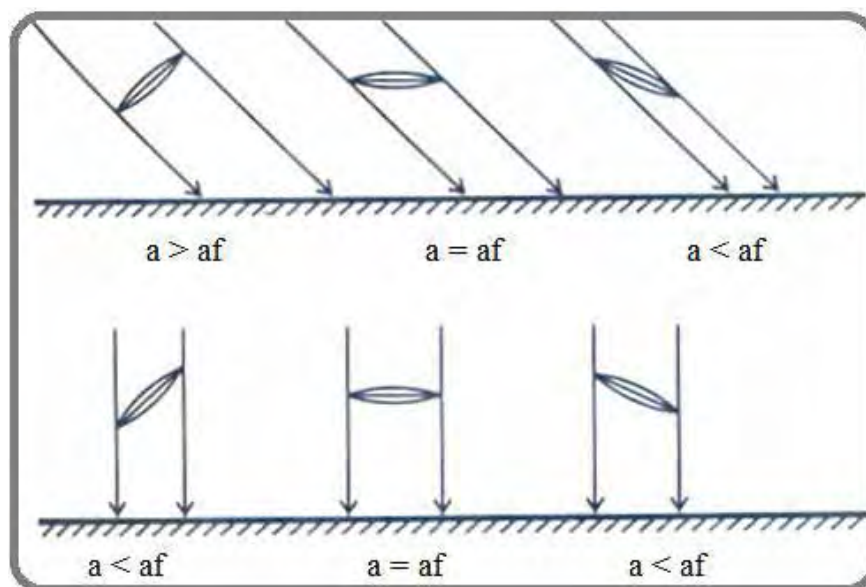


Figura 2. Relação da área sombreada por uma folha sobre o solo (a) e área de uma folha (af) em função da direção dos raios de luz e da orientação da folha (adaptado de Teh, 2006).

Na definição clássica, k representa a área de sombra do dossel sobre uma superfície horizontal dividida pela área das folhas no dossel (MONTEITH, 1973; CAMPBELL, 1986). A influência do ângulo de inclinação e disposição das folhas está inserida a esse fator (k). Segundo Monsi e Saeki (2005), os valores de k são

aproximadamente constantes para as mesmas comunidades de plantas (espécies) e variam bastante em comunidades diferentes. Resultados encontrados pelos mesmos autores informam que, geralmente, valores de k de plantas do “tipo grama” estão aproximadamente entre 0,3 a 0,5, e em plantas do “tipo folha larga” têm valores variando em aproximadamente 0,5 a 0,7. Hirose (2005), em um trabalho de revisão sobre a teoria de Monsi e Saeki em relação à estrutura e função de dossel, explica que os grupos de plantas citados por Monsi e Saeki: “tipo grama” e “tipo folha larga” atribui-se às plantas com folhas posicionadas na vertical e na horizontal, respectivamente.

4.5 Eficiência do Uso da Radiação e Eficiência de Conversão de Energia

A existência de uma forte relação entre a quantidade de energia solar captada por uma cultura e seu crescimento (produção de biomassa) foi comprovada por Monteith (1977). Essa relação é representada pelo conceito Eficiência do Uso da Radiação (EUR) ou RUE (sigla da grafia inglesa *Radiation Use Efficiency*, comumente utilizada na literatura especializada), que é definida com a razão entre a biomassa produzida por certa comunidade de plantas e a radiação interceptada ou absorvida pelo dossel dessas plantas (MONTEITH, 1977). A EUR é uma análise de crescimento baseada na radiação solar, e não em função do tempo (cronológico), por isso o acúmulo de biomassa é normalizado pelo o somatório da energia solar interceptada no decorrer do tempo de um cultivo. Assim, é possível avaliar e comparar o crescimento vegetal entre cultivos em ambientes com níveis de radiação solar diferentes. A análise de crescimento em função do tempo gera avaliações confusas devido as diferentes condições meteorológicas (SINCLAIR; MUCHOW, 1999). Como o valor da EUR varia pouco quando as condições ambientais não são seriamente limitantes (BONHOMME, 2000), esse índice avalia se a cultura está expressando o seu potencial de produção naquele ambiente radiativo. A EUR é potencial (máxima) quando a cultura cresce em condições ótimas (temperatura do ar e do solo, conteúdo de água no solo, fertilidade do solo e fitossanidade) de cultivo (geralmente determinada em experimentos), sendo primordial para calcular a produção máxima de biomassa de uma espécie num determinado ambiente (SOLTANI; SINCLAIR, 2012). Modelos de crescimento de cultura (CANEGRO e as primeiras versões do CERES-Maize) usam a EUR para estimar a taxa de crescimento da cultura diária.

A Figura 3 ilustra como a produção de matéria seca em função da quantidade de radiação solar interceptada por um cultivo é interpretada. Conforme Monteith (1977), a eficiência máxima (e^*) em usar a radiação solar interceptada para produzir matéria seca é representada pela inclinação do segmento de reta AB (plotada na Figura 3), que é encontrado em experimento onde os manejos são ideais ao crescimento. O ponto B representa o máximo acúmulo de matéria seca que é função da máxima radiação interceptada acumulada (i^*), o ponto Q indica que outro cultivo produziria matéria seca com a mesma eficiência do ponto B (ou de qualquer ponto situado no segmento AB), porém a produção de matéria seca (menor) seria relativa à menor radiação interceptada (i). O ponto Q' representa que a produção de matéria seca é menor que a do ponto Q mesmo tendo o cultivo interceptado a mesma quantidade de “ i ” que o ponto Q, ou seja, menor eficiência no uso da radiação. Essa menor eficiência é influenciada pela alteração da taxa fotossintética das folhas, sendo os fatores que mais atuam nesse processo: a temperatura do ar, o estresse hídrico, a concentração de nitrogênio foliar e a concentração de CO_2 atmosférico (SOLTANI; SINCLAIR, 2012).

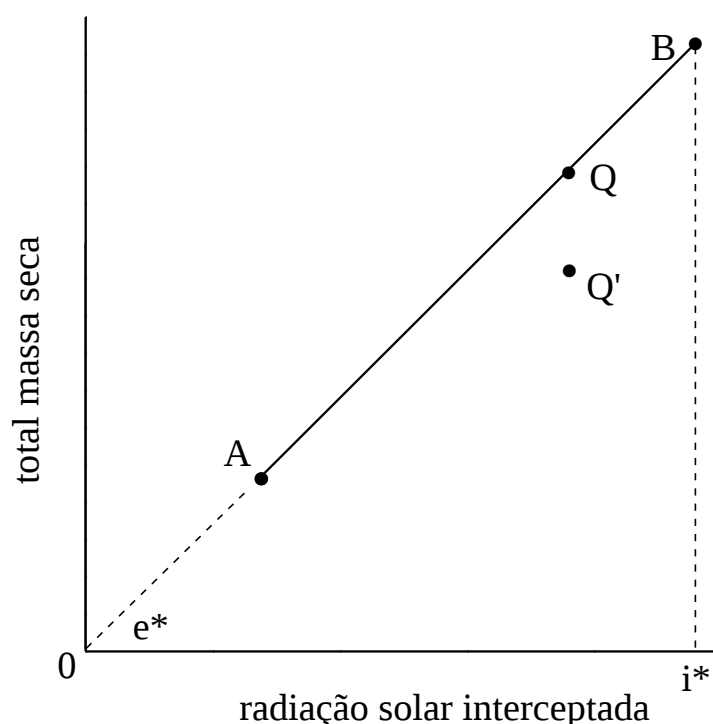


Figura 3. Representação de uma análise de crescimento em função da quantidade de radiação interceptada por uma cultura (adaptado de Monteith, 1977).

Na literatura, comumente encontra-se diferença nos valores de EUR entre espécies, principalmente entre os grupos de plantas com mecanismo de fixação

de carbono do tipo C3 e C4. No geral, plantas C3 os valores são menores que nas plantas C4 (KINIRY et al., 1989). Em revisão sobre EUR feita por Sinclair e Muchow (1999), os autores ressaltaram negligência com as convenções realizadas nos valores de EUR com diferentes metodologias de cálculo, objetivando-se realizar comparações. Uma vez que, a EUR pode ser calculada através de medidas de irradiação solar global ou fotossintética, e também da irradiação interceptada ou absorvida (interceptada menos a refletida) pelo dossel. Bonhomme (2000) propõe fatores de convenções para todas as formas de cálculos da EUR.

Na agricultura, normalmente, são feitas avaliações para comparar desempenho da produção. Muitas vezes, utiliza-se o termo "eficiência" para definir essas avaliações. No entanto, na termodinâmica a palavra eficiência é definida como a fração de saída de energia útil em relação à energia que entrou no sistema em questão (MONTEITH, 1977). Essa definição termodinâmica de eficiência é aplicável ao conceito "eficiência do uso da radiação", uma vez que a fitomassa armazenada é relacionada com a entrada de radiação (energia). Porém, a fitomassa quando expressada como energia (massa da matéria seca multiplicada pelo calor específico de combustão) a proporção (razão) torna-se mais adequada ao princípio termodinâmico (joule por joule). Esse é o conceito chamado de eficiência de conversão de energia (ECE), que quando se compara espécies de planta com diferentes conteúdos de energia apresenta vantagem em relação à EUR (AMTHOR, 2010). O calor específico de combustão (também designado por conteúdo de energia ou poder calorífico) da fitomassa é determinado pela energia liberada na combustão da matéria. Esse varia pouco entre os órgãos vegetativos, geralmente uma média de $17.500,0 \text{ J g}^{-1}$ (LONG et al., 2006), porém, grãos com teor de óleo significativo podem ter maior conteúdo de energia. Nos grãos não oleaginosos o poder calorífero é cerca de $18.000,0 \text{ J g}^{-1}$, mas pode aumentar para $35.000,0$ a $40.000,0 \text{ J g}^{-1}$ em sementes ricas em óleo (ZHU et al., 2010).

Com base em estudos de laboratório, a eficiência de conversão de energia máxima é projetada em 10 %. Todavia, mesmo nos experimentos de campo mais produtivos, as eficiências são menos que a metade das encontradas em estudos laboratoriais, e nos cultivos comerciais apenas uma ECE de 1 a 3 % é obtida (MYAMOTO, 1997). A Figura 4 mostra simulações documentadas por Zhu et al. (2008), em que ECE responde em função da temperatura do ar (15 a 45 °C) e de três concentrações de CO₂ (220, 380, e 700 ppm). O mecanismo fotossintético do tipo C4 não responde as

variações de temperatura do ar e concentração de CO_2 , pois não existe o processo de fotorrespiração. Por outro lado, no mecanismo do tipo C3, a temperatura influencia tanto na solubilidade do CO_2 e O_2 em solução, assim como na especificidade da Rubisco para o CO_2 em relação O_2 , que em conjunto conduz a diminuição da ECE com o aumento da temperatura em consequência do aumento da fotorrespiração. A especificidade é a razão entre as probabilidades da Rubisco realizar carboxilação (fixação de CO_2) e oxigenação (fixação do O_2) (ZHU et al., 2008). Atualmente, com os avanços nas áreas das pesquisas de biologia molecular, sequenciamento genético e bioinformática, esforços estão sendo projetados para a introdução do mecanismo fotossintético do tipo C4 em culturas C3 (SAGE; ZHU, 2011).

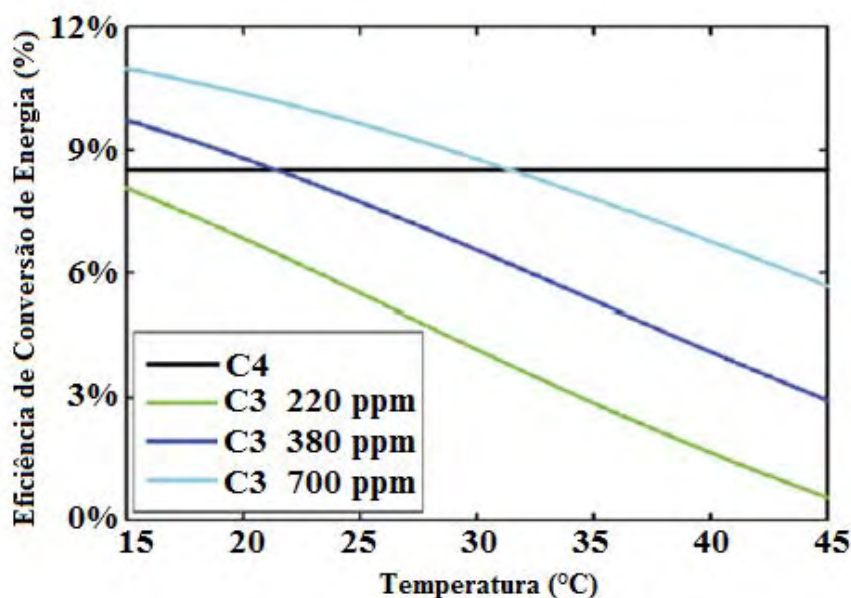


Figura 4. Efeito da temperatura do ar e da concentração do CO_2 sobre a eficiência de conversão de energia em mecanismos fotossintéticos do tipo C3 e C4 (adaptado de Zhu et al., 2008).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área Experimental e Manejo Agronômico

A pesquisa de campo foi realizada com a cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*), variedade RB98710, na área experimental de agrometeorologia da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus Delza Gitaí, que se localiza na cidade de Rio Largo – Alagoas, com coordenadas geodésicas 09°28'02"S; 35°49'43"W e 127 metros. (Figura 5).



Figura 5. Localização da Unidade Acadêmica Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas localizado no município de Rio Largo, Alagoas.

O clima desta região é classificado, segundo o método de Thorthwaite e Mather (1955), como úmido, megatérmico, com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno. Essa classificação é adequada ao uso do espaço (principalmente aplicações agrícolas), tendo como indicativo o balanço hídrico, determinado através da precipitação, evapotranspiração real e características físicas do solo. As médias climatológicas anuais (1972-2010) da precipitação pluvial, temperatura do ar média, umidade relativa média e da fração de nebulosidade são 1789,5 mm, 25,4 °C, 81,8 % e 42,9 %, respectivamente (Figura 6).

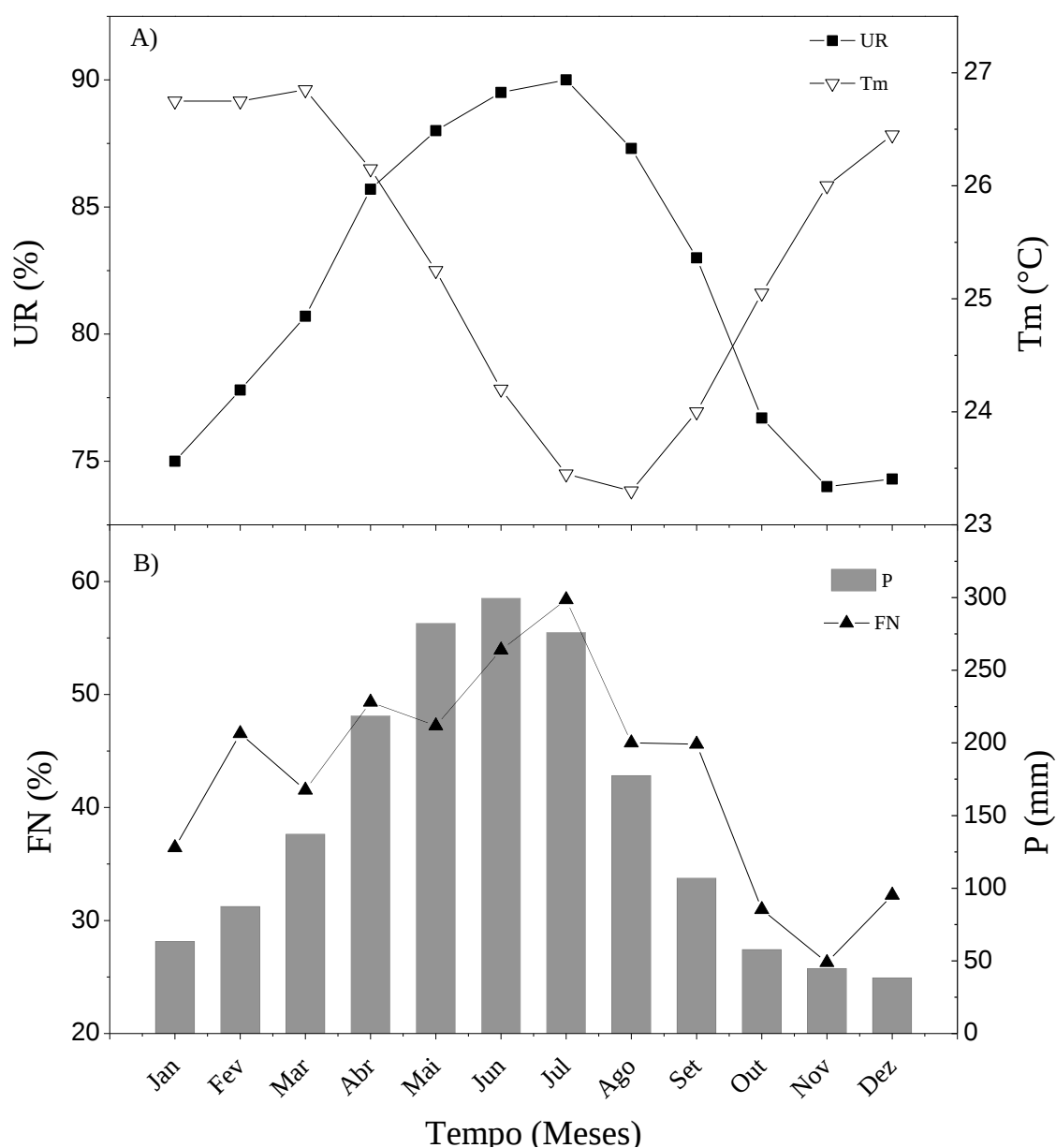


Figura 6. Normais Climatológicas: A) umidade relativa (UR, %), temperatura do ar média (Tm, °C); B) fração de nebulosidade (FN, %) e total de precipitação (P, mm) em Rio Largo-Alagoas, período de 1972 a 2010.

O solo local foi classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso argissólico, de textura média/argilosa, na qual as propriedades físicas do solo para um perfil com profundidade de 0,60 m apresentou em média 56,8 % de areia, 12,8 % de silte e 30,4 % de argila, e uma densidade do solo de $1,32 \text{ g cm}^{-3}$ (COSTA, 2008). A área de topografia amena (declividade inferior a 2%) estava em pousio (sem cultivo) de aproximadamente três anos após um cultivo de quatro ciclos com a cultura de cana-de-açúcar (ALMEIDA et al., 2008; COSTA et al., 2011). Cerca de três meses antes do plantio foi realizada uma roçagem mecanizada, seguida da aplicação manual de calcário (equivalente a 2 toneladas por hectare). Para a realização do plantio foram feitas uma aração e uma gradagem niveladora, após a abertura dos sulcos (sentido Leste-Oeste) realizou-se a adubação de fundação (fundo dos sulcos) com 80 kg ha^{-1} de nitrogênio (N), 120 kg ha^{-1} de pentóxido de fósforo (P_2O_5) e 120 kg ha^{-1} de óxido de potássio (K_2O), com as respectivas fontes: sulfato de amônio, super simples e cloreto de potássio. A adubação de cobertura foi efetuada 77 dias após o plantio (DAP) com 80 kg ha^{-1} de N e 40 kg ha^{-1} de K_2O . O resultado da análise química do solo da área está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo da análise química das amostras de solo da área de campo onde foi realizada a pesquisa.

Determinações*	0-20 cm	20-40 cm	Determinações*	0-20 cm	20-40 cm
pH em água	5,7	4,6	H+Al (meq/100mL)	4,3	4,7
Na (ppm)	19	15	C.T.C – pH 7,0	8,46	7,55
Fósforo (ppm)	12	7	% V	49,2	37,8
K (ppm)	71	35	M.O. Total (%)	1,95	1,51
Ca+Mg (meq/100mL)	3,9	2,7	Fe (ppm)	151,1	189,6
Ca (meq/100mL)	2,9	1,9	Cu (ppm)	2,02	0,87
Mg (meq/100mL)	1,0	0,8	Zn (ppm)	2,65	2,87
Al (meq/100mL)	0,26	0,66	Mn (ppm)	8,79	2,38

* Método Embrapa (Costa et al. 2008); Extração: Água (pH), Mehlich (fósforo, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn), KCl 1N (Ca, Mg, Al), Acetato de Cálcio pH 7,0 (H+Al).

O plantio foi concluído no dia 11 de agosto de 2011, com a distribuição da “cana semente” nos sulcos de maneira que resultasse uma média de 18 gemas por metro linear. A área (480 m^2) foi dividida em duas parcelas constituídas de 12

fileiras de plantio com 20 metros de comprimentos, sendo uma parcela com espaçamento único (convencional) de plantio da região (1 metro entre fileiras) e a outra com o espaçamento combinado (0,6 e 1,4 metro alternadamente entre as fileiras), conforme é ilustrado na Figura 7. Após o plantio aplicou-se (aplicador costal) uma mistura de herbicidas pré-emergentes (115 ml de U46BR + 230 g de Soldier diluídos em 20 litros) e limpas manuais foram executadas nos 69 e 103 DAP para o controle de plantas nativas (plantas indesejadas).

O cultivo foi irrigado por um sistema de gotejamento superficial, com tubos gotejadores (tipo fita) de 16 mm de diâmetro, os emissores espaçados a cada 0,5 metros e funcionando com uma pressão de 98,08 kPa (1,0 kgf. cm⁻²) e uma vazão nominal de 1,5 litros por hora por emissores. As distribuições dos tubos gotejadores nas linhas variaram em relação aos tipos de espaçamento empregado na parcela: 1) nas linhas com espaçamento único foi colocado um tubo gotejador para cada fileira de plantas; 2) nas linhas com espaçamento combinado os tubos gotejadores foram posicionados apenas no centro das entrelinhas de 0,60 m, ou seja, nessa parcela tinha a metade do número de tubos gotejadores em relação à parcela com espaçamento único (convencional). Por conta dessa diferença de quantidade de tubos gotejadores nas parcelas, no manejo da irrigação foi preciso que a parcela com espaçamento combinado ficasse sempre como o dobro de tempo de rega em relação à com espaçamento único. O turno de rega médio foi de dois 2 dias, com uma lâmina variando de 10 a 12 mm por rega. A lâmina de irrigação foi aplicada com base na evapotranspiração da cultura média diária da semana anterior, conforme será explicada na metodologia no tópico 5.2.1. A Figura 8 mostra uma vista aérea do cultivo, sendo possível notar os diferentes espaçamentos entrelinhas de plantio.

A variedade (RB98710) de cana-de-açúcar utilizada no estudo é caracterizada por apresentar ótimo perfilhamento, porte ereto, bom fechamento de entrelinhas, alto teor de açúcar e alta produtividade agrícola (DAROS et al., 2010). Faz parte da nova geração de variedades desenvolvidas pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar (PMGCA) do CECA/UFAL, que está incluído na Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA). A Rede é composta além da UFAL de mais nove universidades federais: UFPR, UFSCar, UFV, UFRRJ, UFS, UFRPE, UFG, UFMT e UFPI (BARBOSA et al., 2012).

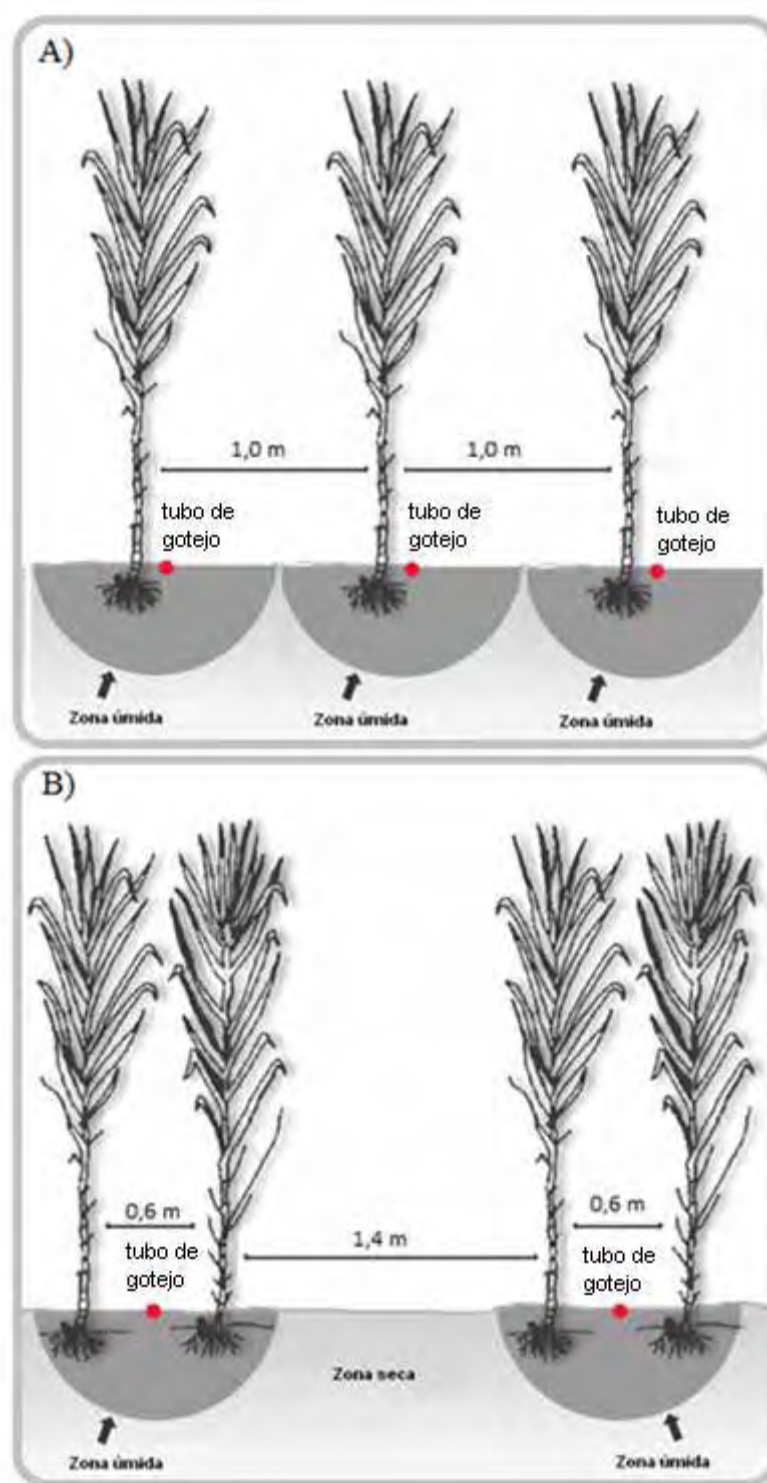


Figura 7. Esquema dos dois tipos de espaçamentos entrelinhas e posicionamento dos tubos de gotejo: A) espaçamento único (1 m); B) espaçamento combinado (1,4 e 0,6 m).



Figura 8. Vista aérea do cultivo de cana-de-açúcar com dois tipos de espaçamentos entrelinhas: espaçamento combinado (esquerda) e espaçamento único (direita).

5.2 Medidas Ambientais

Os dados meteorológicos utilizados na pesquisa foram obtidos da estação agrometeorológica situada ao lado da área de campo (Figura 9). A temperatura e umidade relativa do ar foram medidas por um termohigrômetro (HMP45C, Campbell Scientific, Logan, Utah) instalado a 2,0 m acima da superfície do solo. A precipitação pluvial foi monitorada por um pluviômetro (TB3, Hydrological Services PTY. LTD., Sydney, Austrália) instalado a 1,5 m acima da superfície do solo. A irradiância solar global (R_g , $W\ m^{-2}$) foi obtida por um piranômetro (*Eppley*, modelo 848, B&W) com faixa espectral de 305-2800 nm. A velocidade do vento a 2 m de altura foi obtida por um anemômetro (Modelo RM Young, Campbell Scientific). Os sensores estavam interligados a um sistema de aquisição automático de dados (Microllogger 21XL, Campbell Scientific), que realizava medidas a cada 10 segundos e armazenava médias a cada 10 minutos, com exceção do piranômetro que estava conectado a uma CR1000 (Campbell Scientific) e armazenava as médias a cada 5 minutos.



Figura 9. Estação agrometeorológica automática da Unidade Acadêmica do Centro de Ciência Agrária.

5.2.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi determinada pelo método de Penman-Monteith-FAO 56 (ALLEN et al., 1998):

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

em que, R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹), G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹) considerado igual a 0 (zero) na escala diária, u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹), e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa), e é a pressão parcial do vapor d'água do ar (kPa), T_m é a temperatura do ar média (°C), Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor saturado no ponto da temperatura do ar média (kPa °C⁻¹) e γ é o coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹). O R_n diário foi considerada como fração da irradiação solar global diária (H_g) (R_n = 0,572 (± 0,004) H_g), conforme Figura 10. Essa relação foi

determinada com medições sobre o cultivo da grama (*Paspalum notatum* Flüggé) em condições padrões (Allen et al., 1998), realizadas no período de janeiro a setembro de 2006, sendo utilizados apenas os dias sem precipitação ($n = 158$), pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS) da UFAL (Souza, 2006)¹.

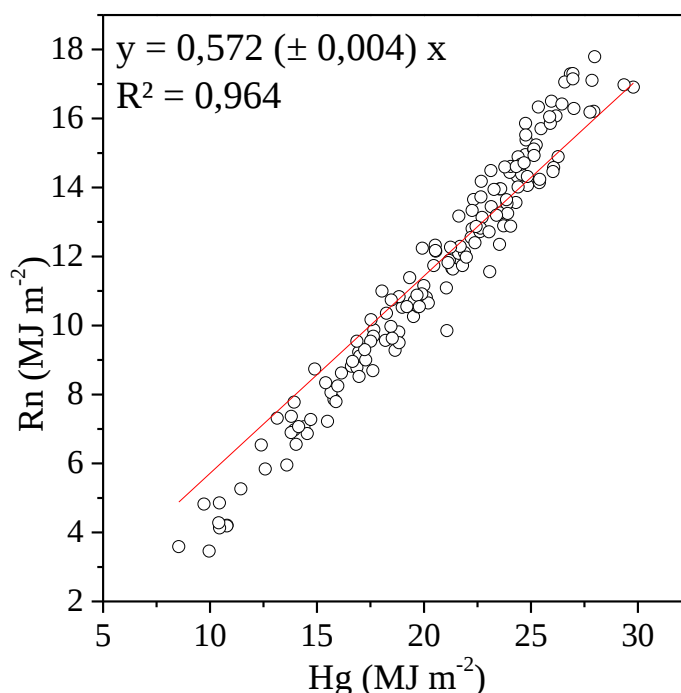


Figura 10. Regressão linear entre o saldo de radiação diário (R_n) e a irradiação solar global (H_g) medições sobre o cultivo da grama em condições padrões, realizadas no período de janeiro a setembro de 2006.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi determinada como produto da ET_o com o coeficiente de cultura (K_c):

$$ET_c = ET_o K_c \quad (2)$$

em que, o valor K_c variou com a fase de desenvolvimento da cultura, com a altura do dossel e com as condições meteorológicas, conforme metodologia apresentada no boletim de irrigação e drenagem, número 56 da FAO – *Food and Agriculture Organization* (ALLEN et al., 1998). Na primeira fase (F1 – fase de crescimento inicial) o valor de K_c foi ajustado as condições locais conforme o método gráfico sugerido no boletim FAO 56,

¹ Souza, J. L. (Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar, UFAL – Campus Maceió. Comunicação Pessoal, 2006)

sendo função dos eventos de molhamento (total de chuva da fase dividida pelo número de dia com chuva maior que 1 mm), da frequência de chuva (intervalos entre dia com chuva) e da ETo média da fase. A F1 compreendeu o período entre o dia do plantio até as plantas cobrirem 10% do solo. A fase seguinte é denominada de fase de desenvolvimento (F2), pois é o período onde as plantas mais crescem, período compreendido do final da F1 (10% de cobertura do solo) até o efetivo fechamento do dossel (80% de cobertura do solo). A terceira fase (F3 – fase média) ocorre do efetivo fechamento do dossel até o início da maturação, nessa fase o valor do Kc é máximo e constante. A última fase (F4 – fase final) ocorreu do início da maturação até a colheita. Os valores de Kc das fases média e final (F3 e F4, respectivamente) foram ajustados conforme sugerido no FAO 56, pelas seguintes equações:

$$Kc = Kc_{(tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,04(URn - 45)](alt / 3)^{0,3} \quad (3)$$

em que $Kc_{(tab)}$ é o valor do Kc tabelado no estágio médio (1,25) e final (0,75) para a cultura de cana-de-açúcar, u_2 é a velocidade do vento média durante a fase (medida a dois metros de altura), URn é o valor média diário da umidade relativa do ar mínima durante a fase, alt é a altura do dossel média durante a fase. Os valores da fração de cobertura do solo (CS) foram determinados como sendo igual à estimativa da fração da radiação interceptada pelo dossel, conforme detalhado no tópico 5.6. A evapotranspiração da real (ETr) da cultura foi resultante do balanço hídrico, conforme detalhado no tópico seguinte.

5.2.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico em escala decendial (dez dias) foi pelo método de Thornthwaite e Mather (1955). Considerou-se um armazenamento máximo de água no solo (de 60,0 mm) igual à capacidade de água disponível ($CAD = 1000 (\theta_{cc} - \theta_{pm}) z$), em que: z é a profundidade efetiva do sistema radicular (0,6 m), θ_{cc} é a umidade volumétrica na capacidade de campo ($0,255 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e θ_{pm} é o ponto de murcha ($0,153 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Os valores de θ_{cc} e θ_{pm} foram determinados no laboratório de Solo, Água e Energia - CECA/UFAL, pela curva de retenção de água no solo. Foi considerada como entrada de água no sistema a precipitação mais a irrigação (P+I) e a saída a evapotranspiração da

cultura (ETc). Como já mencionado o balanço hídrico permite a obtenção da estimativa da ETr. Os cálculos foram realizados através de uma planilha no Microsoft Excel®.

5.2.3 Graus-dia

Os graus-dia acumulados (GDA, °C dia) foram calculados com a temperatura base (Tb) igual 16 °C para fenologia da parte aérea total e como 10 °C para a fenologia da folha (INMAN-BAMBER, 1995; SINCLAIR et al., 2004; SMIT; SINGELS, 2006), e foi determinada pela seguinte expressão:

$$GDA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_x + T_n}{2} \right) - T_b \quad (4)$$

em que, Tx é a temperatura do ar máxima diária(°C), Tn é a temperatura do ar mínima diária (°C) e n é o número de dias observados.

5.3 Medidas de Crescimento

5.3.1 Medidas Biométricas

Foram realizadas em 10 (dez) plantas (escolhidas aleatoriamente) de cada cultivo, com frequência mensal, medidas do comprimento do colmo (cm), altura da planta (cm), comprimento (C, cm) e largura máxima (L, cm) da folha +3, número de entrenós, de folhas verdes completamente desenvolvidas. O número de plantas por metro. A numeração das folhas, a exemplo da “folha +3” citada acima, segue a numeração do sistema Kuijper, que consiste em definir como +1 a primeira folha de cima para baixo que se tem inserida no colmo com a aurícula e a lígula visíveis (Figura 11), as demais folhas abaixo desta recebem a numeração crescente e as acima decrescente (VAN DILLEWIJN, 1952). O comprimento do colmo foi padronizado da base da planta até o ultimo entrenó visível. O “C” e “L” da folha +3 e o números de folhas verdes expandidas (nfv) foram utilizados para estimar a área foliar da planta (AF), conforme a Equação 5, que segue metodologia de Hermann e Câmara (1999).

$$AF = (C * L * Ff) (nfv+2) \quad (5)$$

em que, Ff é o fator de forma para as dimensões foliares, dois (2) é um fator de ponderação para folhas que ainda não estão desenvolvidas totalmente. Por fim, o índice de área foliar (IAF) foi determinado através da multiplicação da AF (média das plantas) pelo número de plantas por metro linear (NPML) e dividido pela área ocupada por essas plantas (AS). Para a definição o NPML, utilizou-se 6 metros lineares, sendo escolhidos os 3 metros centrais das duas fileiras centrais das parcelas.

$$IAF = \frac{AF \cdot NPML}{AS} \quad (6)$$

em que, AS foi igual a 1 metro quadrado.

O Ff foi ajustado, para a variedade em estudo, através de uma regressão linear simples, com o intercepto forçado a passar pela origem ($\beta_0 = 0$), sendo a variável independente o produto do comprimento pela largura ($C \times L$) e a variável dependente a área foliar da mesma folha determinada por meio de um planímetro digitalizador (LI-3100C Area Meter, Li-COR).

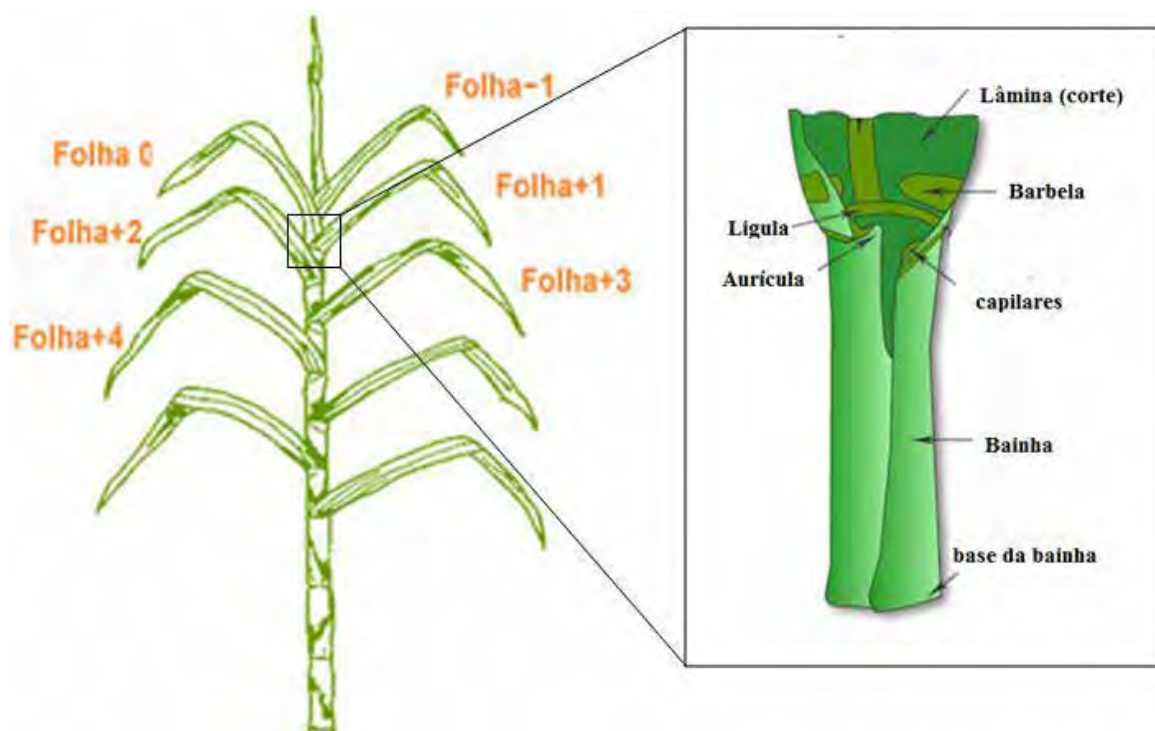


Figura 11. Numeração das folhas pelo sistema de Kuijper (adaptado de Van Dillewijn, 1952).

O IAF foi ajustado em relação os GDA ($T_b = 10^\circ\text{C}$) através de uma regressão não linear, modelo log-normal com três parâmetros (Souza et al., 2012; Ferreira Junior et al., 2012), conforme equação a seguir:

$$y = w_1 \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln(x/w_2)}{w_3} \right)^2 \right] \quad (7)$$

em que, “ w_1 ” é a amplitude de y (IAF), “ w_2 ” é o valor de x (GDA) no qual y é máximo e “ w_3 ” indica o grau de decaimento da variável y . Com esse ajuste foi possível estimar a evolução do IAF (diário) ao longo do ciclo da cultura, variável importante para o cálculo do balanço de radiação nas plantas.

O número de plantas por metro quadrado (plantas m^{-2}), a altura do dossel e o comprimento dos colmos foram relacionados com os GDA ($T_b = 16^\circ\text{C}$) através de regressões não lineares do tipo sigmoidal (modelo Boltzmann), o procedimento foi feito em ambiente Microcal Origin[®] (MICROCAL SOFTWARE, 1999), conforme equação a seguir:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x - X_0)/dx}} + A_2 \quad (8)$$

em que, A_1 e A_2 são, respectivamente, o valor inicial e final de y , x é o GDA, X_0 é o ponto de inflexão, ou seja, valor da ordenada x (GDA) que corresponde ao valor médio de y (X_0 , $(A_1 + A_2)/2$), e o dx é o coeficiente de ajuste, ou seja, indica o grau de incremento de y em função do aumento de x (GDA).

5.3.2 Medidas de Fitomassa

A massa da matéria seca (MS) foi determinada em cinco amostragens ao longo do crescimento (169, 244, 308, 364 e 439 DAP). Em cada amostragem foram cortadas, no nível do solo, 10 plantas aleatoriamente em cada parcela. As plantas foram separadas em folhas e bainhas verdes, colmos desenvolvidos (da base do

colmo até o último nó visível), ponteira (parte imatura do colmo e folhas fechadas) e palha (folhas e bainhas mortas) (Figura 12). Em seguida a massa fresca (kg) foi determinada. Então, o material de cada parte foi triturado em forrageira e após pesadas as subamostras (volume aproximado de 1 litro) foram secadas em estufa em 75 °C até que a massa das mesmas ficasse constante. A MS dos colmos foi ajustada em relação a MS do total da parte aérea através de uma regressão linear. Também foram ajustadas equações entre o teor de água na matéria fresca dos colmos em relação aos dias após o plantio, através de regressões não lineares do tipo sigmodial (modelo Boltzmann), idem a equação 8.



Figura 12. Amostragem de cana-de-açúcar com componentes separados (folhas verdes e secas, colmos e ponteiros).

5.4 Calor Específico de Combustão

O calor específico de combustão da fitomassa das diferentes partes da cana foi determinado (169 dias após o plantio) utilizando-se um Calorímetro IKA C 200 (ASTM D-2382) instalado no Laboratório de Biocombustíveis e Energia (LABEN) da UFAL. Nas determinação foram seguidas as normas ABNT NBR 8633/84. Cada amostragem com aproximadamente 0,5 gramas foi colocada no interior da bomba

calorimétrica. O calor liberado na combustão dessa matéria causa a elevação da temperatura da água dentro do calorímetro. Esta temperatura é medida, com um termômetro de precisão de Beckmann, antes e depois da queima. Essa variação de temperatura, observada no calorímetro é proporcional ao calor que a reação liberta. Após o término do processo de queima, a tela do equipamento mostra o valor do calor específico de combustão em J g^{-1} . Para cada parte da planta foram realizadas duas vezes o procedimento e efetuadas médias entre os resultados. Maiores detalhes sobre a metodologia em Souza (2011).

5.5 Medidas Radiométricas

A irradiância solar fotossintética incidente (R_f , W m^{-2}) foi estimada como 43% da irradiância solar global (R_g , W m^{-2}). Essa fração foi determinada, para a região de estudo, pela relação dessas componentes (Figura 13), que foram mensuradas com sensores padrões (CMP 21, *Kipp & Zonen* e LI-190SA, *Li-COR*, respectivamente para R_g e R_f) usados apenas para calibrações. Esse resultado foi semelhante a outras pesquisas realizadas a região (SOUZA et al., 2005; SOUZA et al., 2011). O sensor CMP 21 é uma piranômetro padrão secundário da *Kipp & Zonen*, que apresenta uma faixa espectral de 285 a 2800 nm e tempo de resposta de cinco segundos.

Os dados de R_g , no decorrer do cultivo, foram medidos por um piranômetro *Eppley* (modelo 848, B&W) localizado na estação agrometeorológica do CECA, que encontra-se ao lado da área de campo onde foi realizada a pesquisa (Figura 9). Foi realizada a calibração do piranômetro *Eppley* com o mesmo sensor padrão (CMP 21) utilizado para determinação da relação R_f versus R_g . A irradiância solar fotossintética transmitida (R_{f_T} , W m^{-2}) pelo dossel foi medida por 18 fotômetros (LI-210SL, *Li-COR*) dispostos em três barras com comprimento de 1 metro (cada barra foi composta de seis sensores distando 20 cm entre eles) e por um sensor Quantum linear (LI-191SA), sendo todos (as três barras de sensores e o sensor linear) colocados diagonalmente na superfície do solo entre as linhas de plantio (Figura 14), conforme sugestões de Monteith (1993).

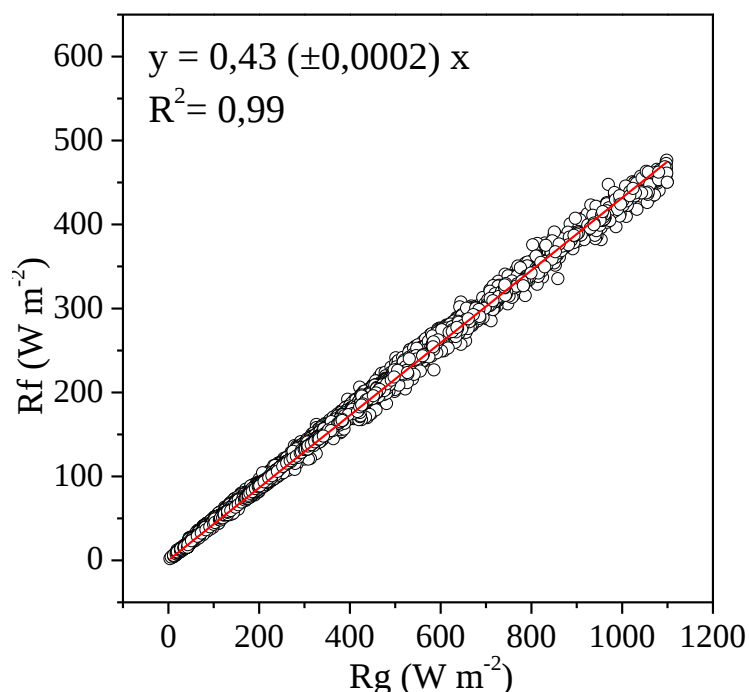


Figura 13. Regressão linear entre irradiância solar fotossintética (Rf) e a irradiância solar global (Rg), para a região de estudo, medidos com sensor Quantum (LI-190SA, *Li-COR*) e piranômetro CMP21(Kipp & Zonen), respectivamente.

Em cada tipo de cultivo (diferentes espaçamentos) foram realizadas cinco campanhas (intervalo mensal de tempo) de medidas da irradiância fotossintética transmitida, no período de 85 a 204 DAP, de modo que representasse a variação da área foliar (IAF entre 1 e 6) durante o desenvolvimento da cultura.. As observações foram realizadas sempre no mesmo horário (10 às 14 horas). Os fotômetros foram programados para realizarem medidas a cada 30 segundos e armazenarem médias a cada 5 minutos. Foram realizadas médias das medidas dos sensores distados na mesma barra e posteriormente computadas as médias do horário de medição (10 as 14 horas). Todos os sensores usados nas medidas da Rf_T através dossel foram calibrados em relação um sensor Quantum (LI-190SA, o mesmo sensor utilizado da determinação da relação Rf versus Rg) para obtenção das densidades de fluxo de fótons fotossintéticos ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) e para a conversão dos correspondentes de irradiância fotossintética (W m^{-2}) utilizou-se o fator de 4,6 ($1 \text{ W m}^{-2} = 4,6 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) (MCCREE, 1972).



Figura 14. Sensores utilizados para medidas da irradiância solar fotossintética transmitida pelo dossel de cana-de-açúcar.

5.5.1 Coeficiente de Extinção da Luz

A fração da irradiância fotossintética transmitida (fRf_T) foi calculada pela razão da Rf_T e Rf entre o período de 10 a 14 horas nos dias 85, 112, 140, 173, 204 após o plantio. O coeficiente de extinção da luz (k) pelo dossel das plantas foi calculado pela Equação 9:

$$k = \left[\frac{-\ln(fRf_T)}{IAF} \right] \quad (9)$$

em que, o IAF é o índice de área foliar correspondente aos dias das medidas de irradiância solar transmitida. O coeficiente de extinção da luz médio, que representa o valor para o ciclo, foi determinado por uma regressão linear passando pela origem ($\beta_0 = 0$) entre o negativo do logaritmo natural da fRf_T e o IAF.

5.6 Cobertura do Solo

A fração de cobertura do solo (CS) ao longo do ciclo da cultura foi considerada igual à estimativa da fração da radiação fotossintética interceptada (fRf_int), conforme equação (10) (ADAMS; ARKIN, 1977).

$$CS = fRf_int = 1 - \exp(-k \text{ IAF}) \quad (10)$$

em que, k é o coeficiente de extinção da luz e IAF é o índice de área foliar. Também foi ajustada uma relação entre a fração de CS (usando os dados medidos de radiação transmitida para obter a fração de CS) e o IAF. Para obter essa relação ajustou-se uma regressão polinomial de segundo grau, concordando com pesquisa realizada por Barbieri e Tuon (1992).

5.7 Eficiência do Uso da Radiação (EUR)

Para o cálculo da EUR, primeiramente determinou-se a irradiação fotossintética interceptada em escala diária (Hf_int , $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) pela multiplicação da irradiação fotossintética incidente ($Hf = Hg \times 0,43$, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) com a estimativa da fração da irradiação fotossintética interceptada ($1 - \exp(-k \text{ IAF})$), em que o k utilizado foi com valor constante (coeficiente angular da regressão linear entre o negativo do logaritmo natural da fRf_T e o IAF). Posteriormente estimou-se a EUR através de regressão linear, forçada a passar pela origem ($\beta_0 = 0$), entre MS da parte aérea (exceto as folhas secas) acumulada e a Hf_int acumulada. Também foi ajustada uma relação apenas com as duas primeiras amostragens de MS, incluído as folhas secas.

5.8 Eficiência de Conversão de Energia (ECE)

A ECE expressa a proporção de energia armazenada na fitomassa acumulada em um ciclo (ou período) vegetal em relação ao fluxo de energia solar durante esse período. No presente trabalho a ECE foi calculada pela razão entre a energia armazenada na MS acumulada (Energia de fitomassa - E_{FM} , joules m^{-2}) e a Hf interceptada acumulada no mesmo período:

$$ECE = E_{FM}/Hf_int \quad (11)$$

em que, E_{FM} foi determinada através da multiplicação da MS acumulada e o calor específico de combustão. Esse último foi mensurado utilizando-se um Calorímetro, conforme citado anteriormente (item 5.4).

5.9 Variáveis de produção

A produtividade agrícola ou toneladas de colmos industrializáveis por hectare (TCH) foi determinada com auxílio de uma balança digital, com capacidade para 100 kg. As amostragens foram feitas nas duas linhas centrais de cada parcela (5 metros lineares). As análises das características agroindustriais (qualidade da matéria prima) dos colmos, necessária para o cálculo da produtividade de açúcar, foram feitas no Laboratório da Usina Santa Clotilde, localizada em Rio Largo – AL. Para essas análises foram amostradas dez colmos de cana-de-açúcar selecionados aleatoriamente nas parcelas. A produtividade de açúcar ou toneladas de açúcar por hectare (TAH) foi obtida através do produto entre a TCH e a PC (pol da cana), dividido por cem. O pol (porcentagem de sacarose aparente) da cana é uma característica que expressa o teor de sacarose no caldo da cana.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Medidas Ambientais

Os valores diários dos elementos meteorológicos (temperatura do ar média - T_m , umidade relativa do ar média - UR_m , precipitação - P e irradiação solar global - H_g) juntamente com a quantidade de água aplicada (irrigação, I) no decorrer do ciclo da cultura são ilustrados na Figura 15. Durante o ciclo da cultura a T_m variou entre 21,1 e 27,3 °C e teve valor médio de 24,2 °C (Figura 15-A), valor abaixo da faixa determinada como ótima (28 a 30 °C) para duas variedades de cana-de-açúcar avaliadas na Austrália (LIU et al., 1998). Glasziou et al. (1965) relataram que a temperatura ótima para a produção de matéria seca da cana-de-açúcar igual a 30 °C. Em pesquisa com temperatura controlada, Inman-Bamber et al. (2010) citaram que o comprimento de entrenós de cana foi reduzido quando a temperatura foi reduzida de uma média diária de 26,6 para 25,2 °C, e concluíram que a temperatura ótima (média diária) para o alongamento dos entrenós está entre 26 e 31 °C. Durante o ciclo do cultivo da presente pesquisa a T_m diária teve o valor menor que 26 °C em 413 dias (aproximadamente 94 % dos dias do ciclo). Já a UR_m no ciclo foi igual a 77,4 %, com variação de 67,4 a 92,3 %. A precipitação durante os 440 dias de cultivo foi de 1.415,3 mm, com uma magnitude (precipitação média por evento de molhamento) de 5,3 mm e frequência de um evento de chuva a cada 1,6 dias. Porém na região existe um período do ano, entre os meses de abril a agosto, que concentra o maior volume de chuva (72% do total anual), caracterizando um período chuvoso e outro período menos chuvoso (entre setembro a março) (SOUZA et al., 2004). Assim, a magnitude e a

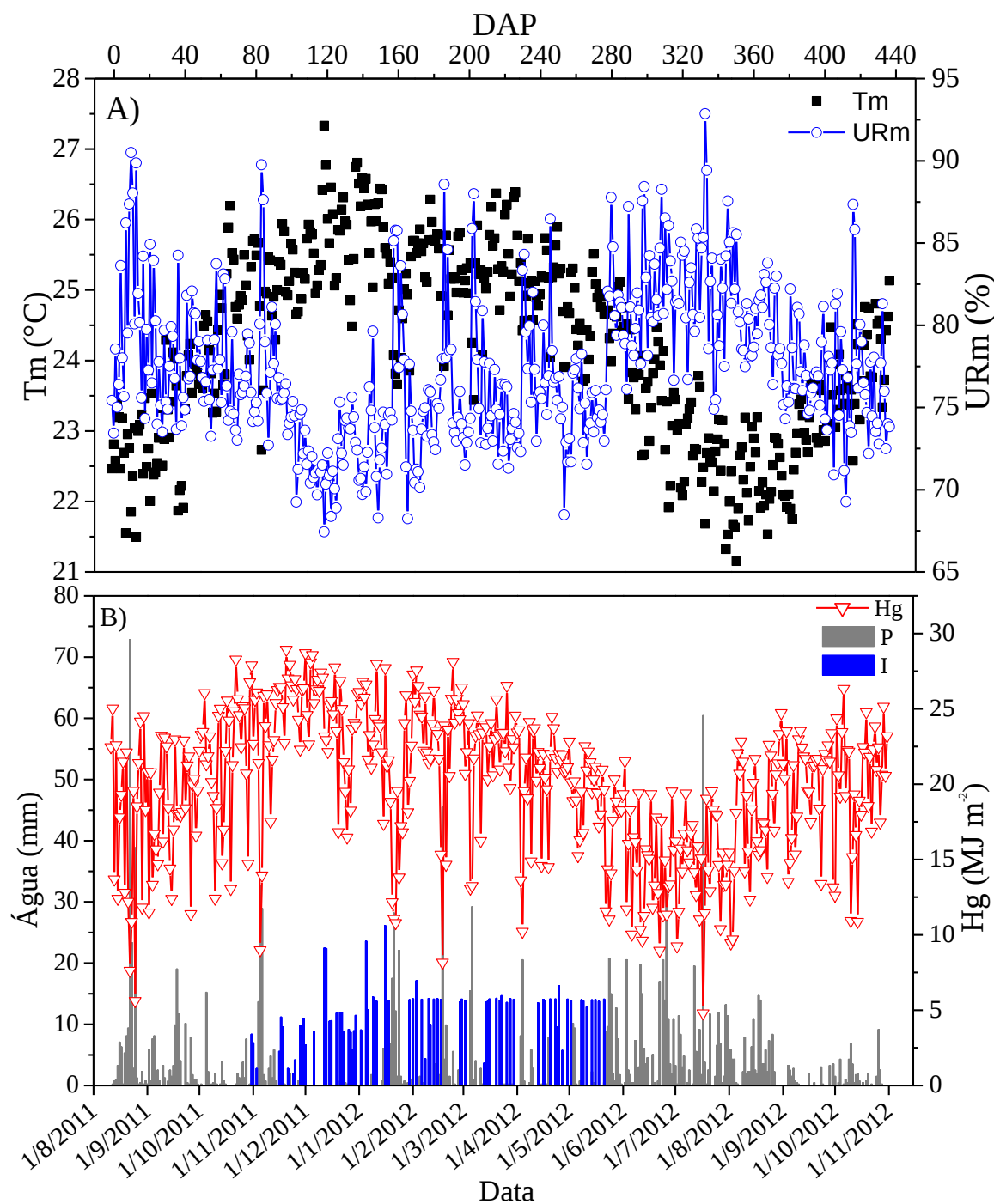


Figura 15. Principais elementos meteorológicos diários: A) temperatura do ar média (T_m , °C) e umidade do ar relativa média (URm, %); B) precipitação (P, mm), irrigação (I, mm) e irradiação solar global (Hg, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$). DAP = dias após o plantio.

frequência de evento de chuva do ciclo (~14 meses) não representam satisfatoriamente as características pluviais da região. A aplicação de água via irrigação totalizou 900 mm (para ambos os cultivos), entre os meses de novembro de 2011 e maio de 2012, suprimindo parte da demanda hídrica da cultura no período menos chuvoso. A irradiação solar global média diária durante o período do cultivo foi igual a $19,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, com valor máximo de $28,9 \text{ MJ m}^{-2}$ e o mínimo de $4,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Nos meses de junho e julho de 2012 a média diária foi relativamente baixa ($14,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Figura 15-B) devida, principalmente, à alta cobertura de nuvens nessa época do ano. A irradiação solar global foi mais elevada nos meses, que correspondem ao período menos chuvoso (Outubro a Abril) com média diária de $22,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Os elementos meteorológicos têm tendências diferentes entre as fases de cultivo, principalmente porque a cana-de-açúcar é uma cultura com ciclo longo (440 dias no presente trabalho). Assim, os efeitos da sazonalidade sobre os elementos ambientais são observados entre as fases de crescimento. Na Fase 1 do ciclo (fase de crescimento inicial; 11/08 a 07/10 de 2011) a T_m foi igual a $23,1^\circ\text{C}$, a UR_m em torno de 78,8 %, o somatório de precipitação foi de 309,4 mm (magnitude = 6,3 mm e frequência de um evento em cada 1,2 dias) e a H_g aproximadamente de $18,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Já na Fase 2 (fase de desenvolvimento; 08/10 a 07/12/2011) a T_m foi superior a da fase anterior ($25,0^\circ\text{C}$), logo a UR_m teve uma redução (76,1 %), a precipitação acumulada diminuiu (total = 123,2 mm; magnitude = 3,7 mm e frequência de um evento em cada 1,8 dias), no entanto aplicou-se 90 mm de água via irrigação e a H_g foi de $23,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A Fase 3 (fase média; 08/12/2011 a 17/07/2012), por ser a de maior comprimento (223 dias), teve grande variação dos elementos meteorológicos, pois iniciou dentro do período menos chuvoso e prolongou-se até próximo do fim do período chuvoso, a T_m , UR_m , P e H_g foram de $24,8^\circ\text{C}$, 76,9 %, 734,3 mm e $19,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ respectivamente. A precipitação dessa fase teve magnitude de 6,1 mm e frequência de 1 evento em cada 1,8 dias. O maior volume de água aplicada via irrigação foi nessa fase, que totalizou 810 mm. Durante a Fase 4 (fase de maturação; 18/07 a 24/10/2012) a T_m teve valor de $23,0^\circ\text{C}$, a UR_m de 78,7 %, a P acumulo 248,4 mm (magnitude = 3,8 mm e frequência de um evento em cada 1,5 dias) e a H_g $18,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A Figura 16 mostra os totais em escala decendial da E_{To} , E_{Tc} e E_{Tr} juntamente com o K_c no decorrer do ciclo da cultura para ambos os cultivos. É possível observar a relação da E_{Tr} com a condição hídrica, pois o déficit de água no solo a E_{Tr} foi atenuada.

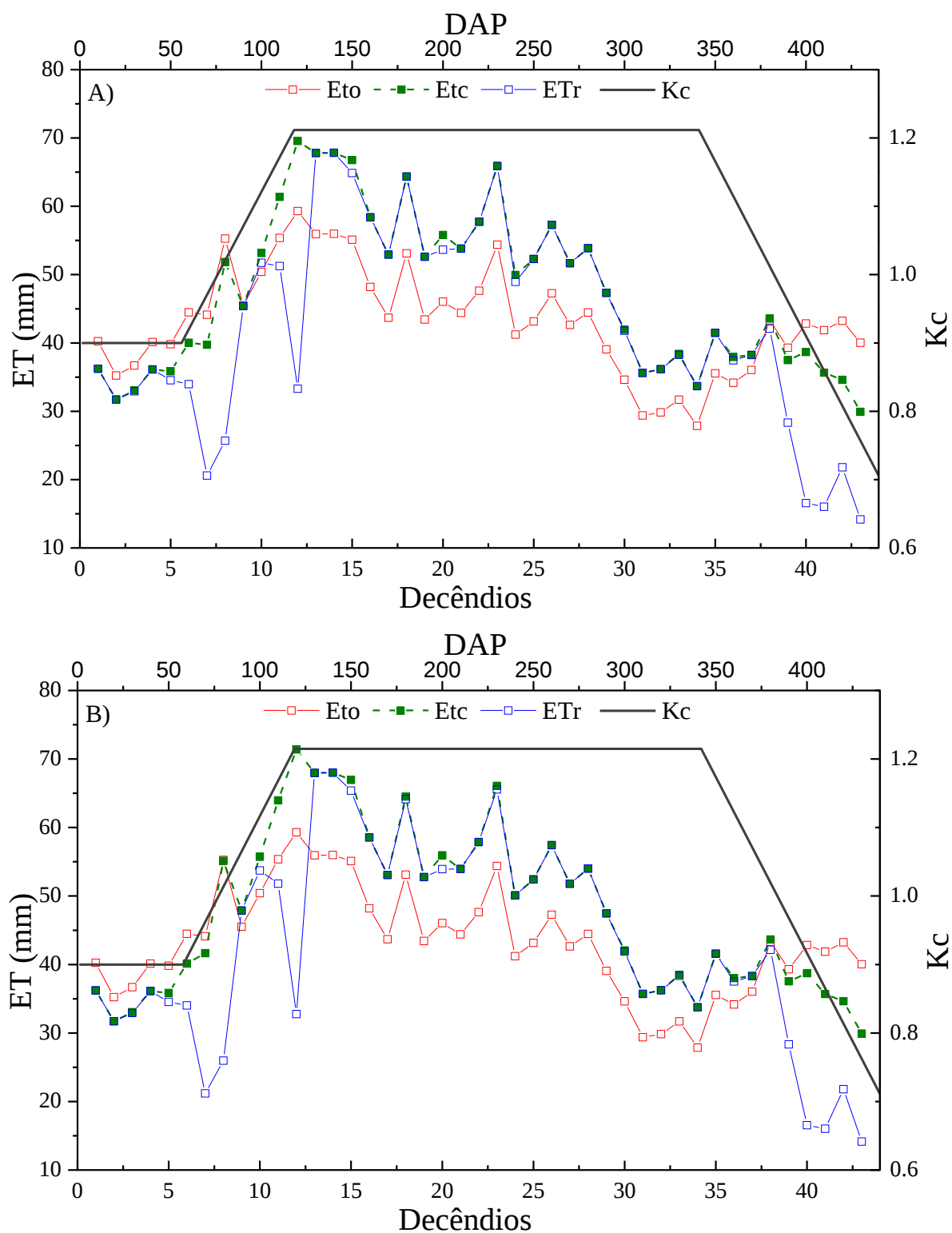


Figura 16. Evapotranspiração de referência (ETo), da cultura (ETc), real (ETr) e coeficiente da cultura (Kc) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado.

Os valores de ET_o e K_c foram equivalentes para ambos os espaçamentos utilizados, e consequentemente os valores médios de ET_c foram semelhantes (Tabela 2). A ET_c média diária do ciclo foi de 4,7 mm, sendo próximo ao determinado por Lyra et al. (2007), para a mesma região de estudo que foi de 4,6 mm d^{-1} . Na Fase 1, a ET_o média foi de 3,8 mm d^{-1} , já o K_c foi ajustado para 0,9. Santos et al. (2009) encontraram valor superior do K_c (1,15) para mesma fase em simulação de cultivo de cana-planta com aproximadamente mesma época de plantio (15/08) usando dados climatológicos da mesma região do estudo, todavia a ET_o média da fase foi inferior (3,0 mm d^{-1}) o que justifica esse maior valor do K_c da fase inicial. Na Fase 2 a ET_o média foi maior (5,0 mm d^{-1}) que a média da Fase 3 (4,3 mm d^{-1}), porém as médias da ET_c dessas fases foram equivalentes (5,3 mm d^{-1}) em função dos diferentes valores do K_c . Na Fase 4 a ET_o média diária (3,9 mm d^{-1}) diminuiu em relação a fase anterior.

Tabela 2. Comprimento das fases de desenvolvimento, coeficiente da cultura (K_c), evapotranspiração de referência (ET_o) e da cultura (ET_c) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: espaçamento simples e espaçamento combinado.

Fases*	ET_o (mm)	Espaçamento Único			Espaçamento Combinado		
		dias	K_c	ET_c (mm)	dias	K_c	ET_c (mm)
F1	3,8	56	0,9	3,5	57	0,9	3,5
F2	5,0	62	0,9-1,21	5,3	61	0,9-1,21	5,3
F3	4,3	223	1,21	5,3	223	1,21	5,3
F4	3,9	99	1,21-0,71	3,7	99	1,21-0,71	3,7
ciclo	4,3 ^m	440	-	4,7 ^m	440	-	4,7 ^m

* Fases de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar conforme metodologia encontrada no boletim de irrigação e drenagem n° 56 da FAO.

^m = valores médios do ciclo.

O balanço hídrico da cultura no decorrer do cultivo mostrou déficit hídrico acumulado de 187,3 mm e 196,3 mm para os cultivos com espaçamento entrelinhas de plantio único e combinado, respectivamente (Figura 17). E devido, principalmente ao período chuvoso da região concentrar mais que 70% do volume de chuva, o balanço hídrico apresentou excesso de água no ciclo de 509,1 mm (espaçamento único) e 524,7 mm (espaçamento combinado).

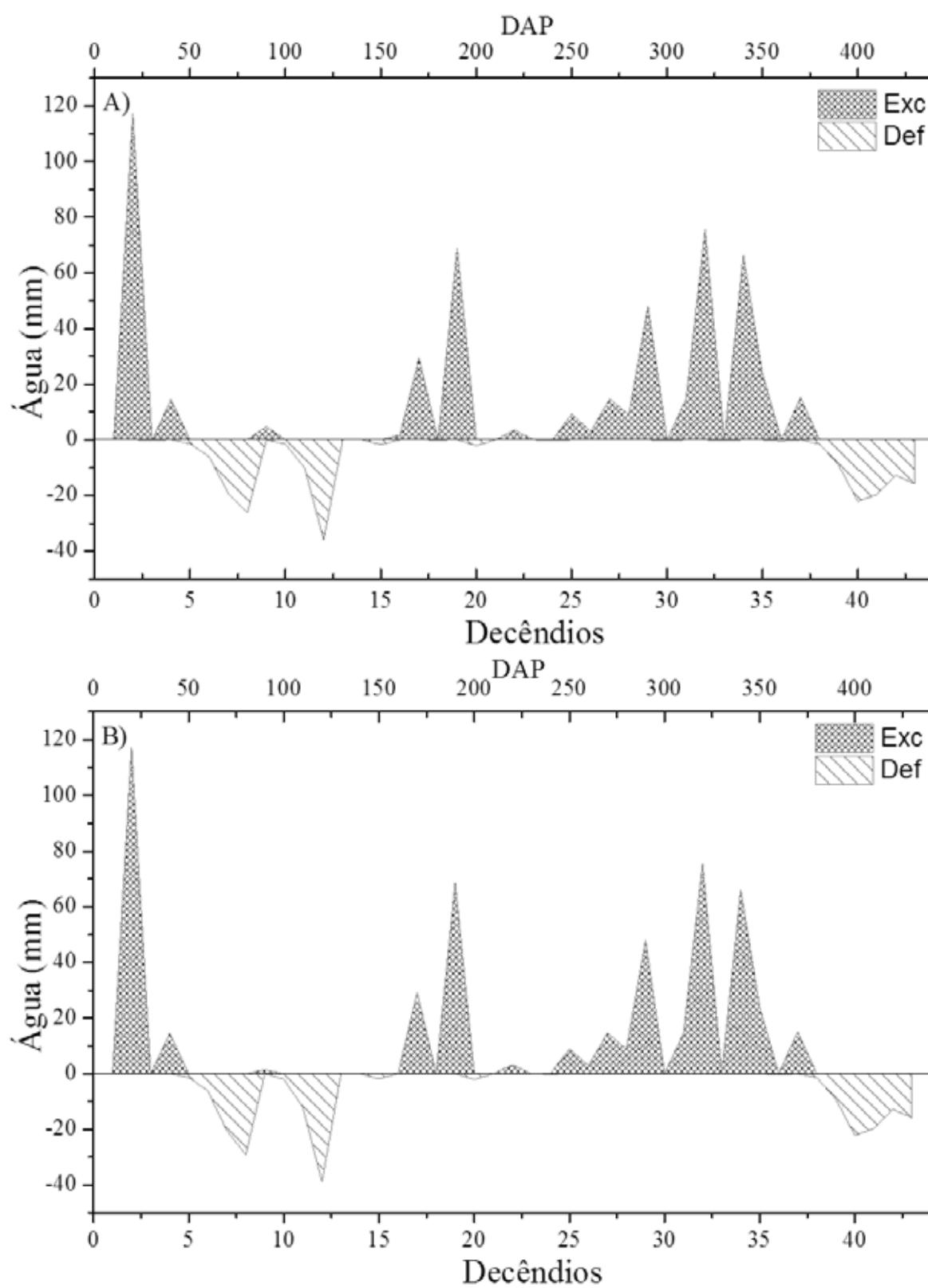


Figura 17. Déficit (Def) e excesso hídrico (Exc) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado.

Em ambos os balanços hídricos (Figura 17) são observados a existência de déficit de água entre os decêndios 6 ao 12 que totalizou em média 102 mm. Esse déficit hídrico foi ocasionado por falhas no sistema de irrigação, todavia no período de desenvolvimento das plantas (51 a 121 DAP), que ocorreu esse déficit, não ocasionou danos aparentes em relação ao crescimento vegetativo (altura e área foliar). O déficit de água no solo desse balanço hídrico (Thornthwaite e Mather) é considerado quando o valor do armazenamento de água é inferior ao valor máximo (CAD), assim mesmo o balanço mostrando déficit de água no solo (moderados) a cultura ainda consome água sem sofre estresse hídrico. O outro déficit visível no balanço hídrico (final do ciclo, decêndios 39 a 44) foi programado, pois é uma prática comum na cultura, para que as plantas aumentem a concentração de sacarose nos colmos e para facilitar as operações mecânicas da colheita (INMAN-BAMBER, 2004). A fotossíntese é menos sensível ao déficit hídrico que o crescimento, assim a concentração de sacarose ocorre devido às plantas pararem de crescer e a demanda por fotoassimilados diminuir.

6.2 Medidas de Crescimento

6.2.1 Fator de Forma

Um coeficiente importante para estimativa não destrutiva da área foliar se baseado em medidas lineares é obtido pelo ajuste da regressão linear entre as medidas da área foliar, obtidas por meio de integrador de área foliar (LI-3100C) e o produto do comprimento pela largura ($C \times L$) das folhas, conforme é mostrada na Figura 18. O coeficiente angular (β_1) resultante desse polinômio de primeiro grau forçado a passar pela origem ($\beta_0 = 0$) representa o fator de ajuste ou fator de forma (Ff). O valor de β_1 foi igual a 0,65, o ajuste teve coeficiente de determinação (R^2) de 0,96, indicativo que as dimensões da foliar permitem explicar a maior parte da variabilidade da área foliar. Robertson et al. (1998) observaram a variedade Q117 (cana-de-açúcar), na Austrália, e relataram um fator de forma igual a 0,62. Sinclair et al. (2004) observaram na Florida, em quatro variedades de cana-de-açúcar (CP80-1743, CP88-1762, CP72-2086 e CP89-2143) um fator de forma médio de 0,72 com variação entre 0,70 (CP72-2086) e 0,73 (CP89-2143). Silva (2009) estudando a variedade RB92579 de cana-de-açúcar (em Juazeiro - município da Bahia, Brasil) encontrou valor de Ff igual a 0,69. Esses valores mostram que

o fator de forma (0,75) determinado para a cultura do milho (MONTGOMERY, 1911; FRANCIS et al., 1969) e que é utilizado como padrão para estimativa da área foliar de plantas de cana-de-açúcar, por apresentar folhas com forma similares, têm variação entre as variedades de cana-de-açúcar.

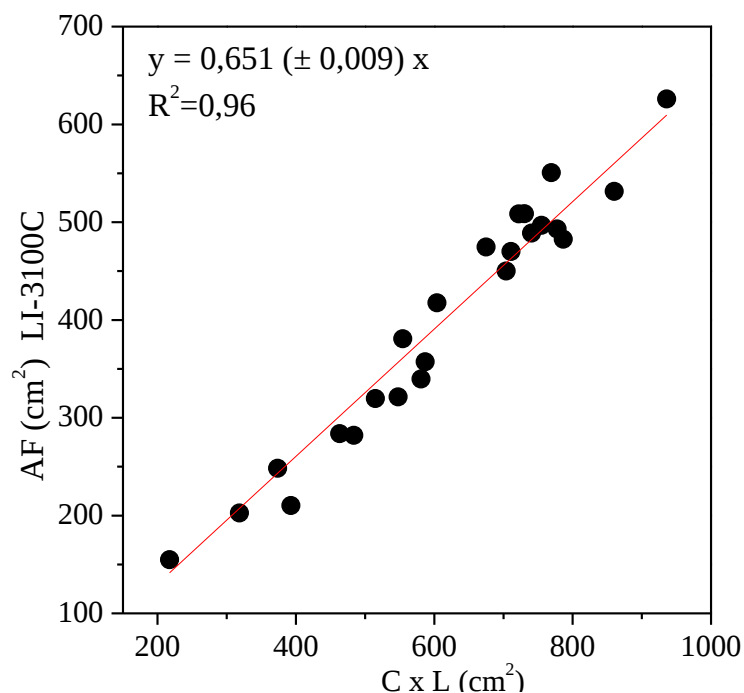


Figura 18. Relação entre medidas da área foliar (AF) através do integrador de área (LI-3100C) e da área oriunda do produto do comprimento (C) pela largura máxima (L) das mesmas folhas de cana-de-açúcar, variedade RB98710.

6.2.2 Variáveis de Crescimento

Os valores de IAF das plantas cultivadas nos dois tipos de espaçamentos entrelinhas de plantio ao longo do ciclo, quando correlacionados com os graus-dia acumulados (GDA) (Figura 19), apresentaram elevados R^2 (0,989 e 0,980, respectivamente para o espaçamento único e o combinado). Com esses ajustes (modelo log-normal, com três parâmetros) foi possível à estimativa diária do IAF no ciclo, informação essencial para estimativa da fração de radiação transmitida pelo dossel. As plantas dos cultivos necessitaram de uma acumulo de GD ($T_b = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) em torno de 3.334,8 $^{\circ}\text{C}$ dia (219 DAP) (espaçamento único) e 3.350,6 $^{\circ}\text{C}$ dia (220 DAP) (espaçamento combinado) para atingirem os valores máximos de IAF, que foram estatisticamente semelhantes em ambos os cultivos (Tabela 4), aproximadamente 6,5.

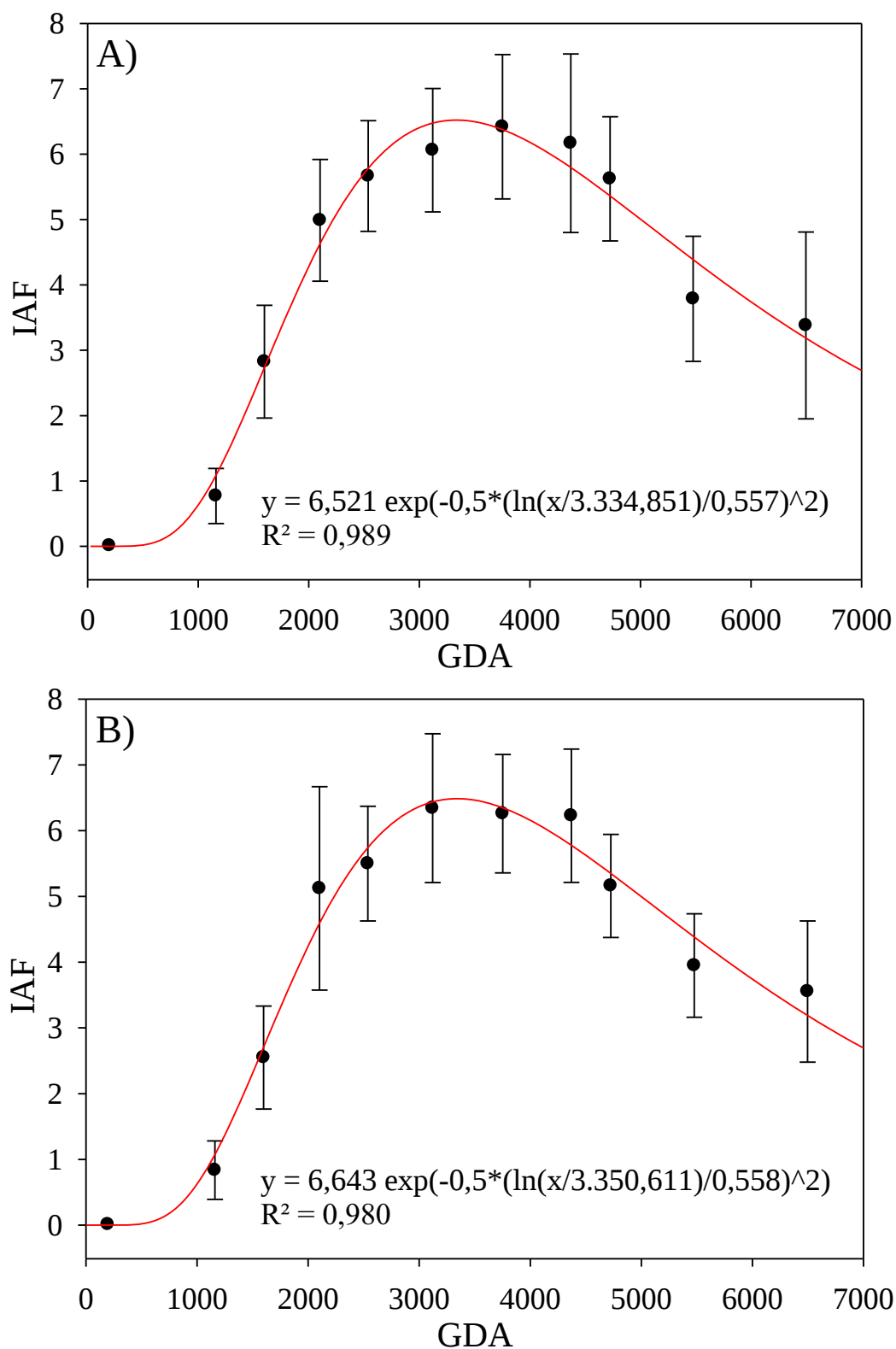


Figura 19. Relação entre o índice de área foliar (IAF) e os graus-dia acumulados (GDA) ($T_b = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado.

As variáveis de crescimento: número de plantas por metro quadrado (perfilhos industrializáveis), altura do dossel e comprimento dos colmos em funções dos graus-dia acumulados estão demonstrados na Figura 20. O número de plantas por metro quadrado varia devido à competição pelos recursos naturais, tais como luz, água e nutrientes. O número de plantas teve ajuste satisfatório com o GDA ($T_b = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$), os valores dos coeficientes das equações estão na Tabela 3. O valor máximo, amostrado em 81 DAP (670,0 $^{\circ}\text{C}$ dia, $T_b = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$), foi de 25,7 (espaçamento único) e 27,3 (espaçamento combinado) plantas m^{-2} . Singels et al. (2005) encontraram valor máximo em torno de 24 plantas m^{-2} , aproximadamente com acúmulo de unidades térmicas de 700 $^{\circ}\text{C}$ dia. No presente estudo foi possível constatar diminuição brusca da densidade de plantas por metro quadrado entre o período compreendido de 144 a 165 DAP (± 1000 a $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ dia) em ambos os cultivos. Após esse período a tendência foi de estabilização do número de plantas m^{-2} com valor médio de 14 ($\pm 0,35$) e 13 ($\pm 0,36$), respectivamente no espaçamento único e combinado. Em variedades sul-africanas, Inman-Bamber (1994) citou necessidade de 1200 $^{\circ}\text{C}$ dia ($T_b = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$) para o valor do número de plantas m^{-2} torna-se aproximadamente constante. Já Bezuidenhout (2000) relatou que a população (plantas m^{-2}) atingiu valor constante após tempo térmico de 2000 $^{\circ}\text{C}$ dia. Em Juazeiro, a variedade RB92579 (cana soca) necessitou de 1380 $^{\circ}\text{C}$ dia ($T_b = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$) para a estabilização do número de plantas (SILVA et al., 2012).

A altura do dossel em ambos os cultivos atingiu valor próximo de 350 cm aos 204 DAP (1900 $^{\circ}\text{C}$ dia). Nesse dia ocorreu a última amostragem da altura do dossel, pois no intervalo até a sucessiva amostragem biométrica (244 DAP) aconteceu o fenômeno denominado de “tombamento” das plantas. O tombamento consiste da queda das plantas em função de fatores variados, tais como altura dos colmos, hábito de crescimento, ventos fortes, algum tipo de deficiência nutricional nos colmos ou raízes, ou elevada massa dos colmos (CARLIN et al., 2008). A altura do dossel foi ajustada em função dos GDA ($T_b = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$), com elevados valores de R^2 (Tabela 3). O comprimento dos colmos mostrou taxa de incremento elevada (aproximadamente $1,30\text{ cm dia}^{-1}$), entre o surgimento até em torno de 3000 $^{\circ}\text{C}$ dia (324 DAP), após esse período a taxa de incremento teve notável diminuição, consequência da maturação das plantas. A máxima taxa de incremento média diária foi $1,65\text{ cm dia}^{-1}$ (140 a 267 DAP) no espaçamento único e $1,66\text{ cm dia}^{-1}$ (168 a 211 DAP). Silva et al. (2012) relatou um incremento médio na estatura dos colmos de cana-de-açúcar de $1,8\text{ cm dia}^{-1}$ para a variedade RB92579.

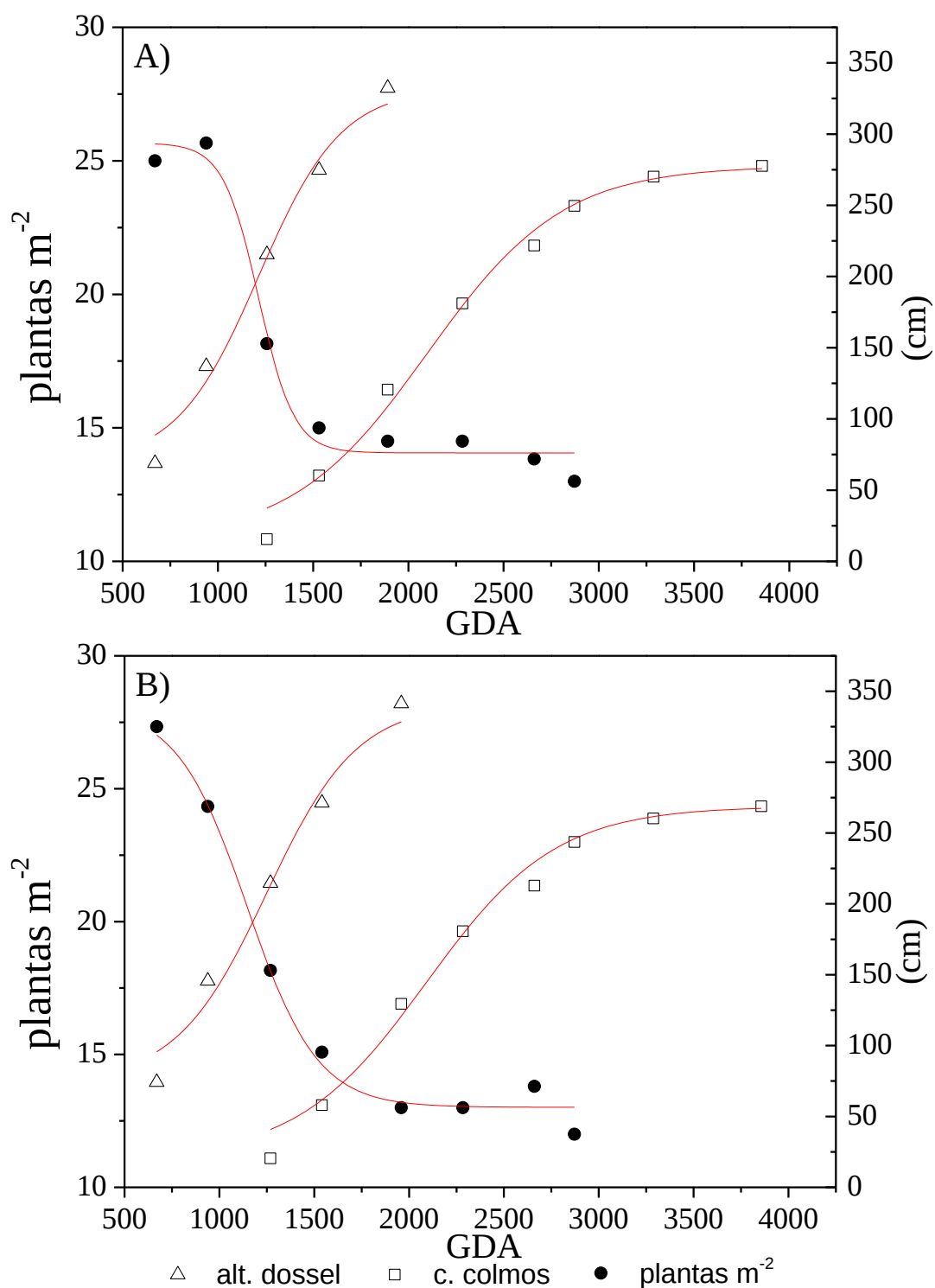


Figura 20. Número de plantas por metro quadrado (plantas m⁻²), altura do dossel (alt. dossel) e comprimento dos colmos em funções dos graus-dia acumulados (GDA) (Tb = 16 °C) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado.

Tabela 3. Coeficientes das equações (Boltzmann) das relações entre número de plantas por metro quadrado (plantas m⁻²), altura do dossel (alt. dossel), comprimento dos colmos (c. colmos) versus os graus-dia acumulados (temperatura base = 16 °C) na cultura da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: espaçamento simples e espaçamento combinado.

		plantas m ⁻²			alt. dossel			c. colmos		
		valor	EPE ¹	p [*]	valor	EPE	p	valor	EPE	p
Espaçamento único	A1	25,67	0	-	68,93	0	-	15,6	0	-
	A2	14,06	0,35	< 0,01	332,33	0	-	277,6	0	-
	xo	1213,86	27,95	< 0,01	1213,96	35,37	< 0,01	2102,98	37,85	< 0,01
	dx	93,25	33,06	0,037	212,46	32,01	< 0,01	354,77	32,52	< 0,01
	R ²	0,979	-	-	0,979	-	-	0,987	-	-
Espaçamento combinado	A1	27,339	0	-	74,2	0	-	20,43	0	-
	A2	13,05	0,36	< 0,01	341,33	0	-	268,8	0	-
	xo	1168,03	31,17	< 0,01	1248,78	43,29	< 0,01	2091,68	39,34	< 0,01
	dx	167,65	25,18	< 0,01	235,41	40,59	0,01	340,82	34,89	< 0,01
	R ²	0,984	-	-	0,972	-	-	0,985	-	-

¹(EPE) erro padrão de estimativa

^{*}(p) probabilidade de t(calculado) > t (tabela)

$$y=A2+(A1-A2)/(1+\exp(((x-xo)/dx)))$$

6.3 Coeficiente de Extinção

Na Tabela 4, são mostrados IAF, fRf_T e o k nos respectivos dias após o plantio que foram realizadas medidas da Rf_T para os dois espaçamentos entrelinhas de plantio. Os valores de IAF das plantas não foram significativamente diferentes entre os dois espaçamentos entrelinhas de plantio, em todos os dias de amostragens, conforme indicou o teste t no nível de 5% de probabilidade (Tabela 4). No espaçamento único os valores de k variaram de 0,36 a 0,53, já no espaçamento combinado essa variação foi de 0,45 a 0,56. O valor máximo de k ocorreu no espaçamento combinado,

quando o valor do IAF era inferior a 1. Nesse tipo de arranjo de linhas de plantio a radiação é transmitida com grande variação, ficando a cobertura vegetal concentrada em uma faixa e outra descoberta. Assim a fração de luz transmitida foi maior que no espaçamento único, resultado no valor de k máximo.

A tendência dos valores de k ao longo do tempo foi crescente para o cultivo com espaçamento único que apresentou dossel mais uniforme. Resultados equivalentes foram relatados por Zhou et al. (2003) e Inman-Bamber (1994), que citaram aumento em k com o incremento da idade da cultura. No modelo de crescimento Canegro, o valor de k varia durante o desenvolvimento da cultura, sendo calculado em função do número total de folhas por colmo (SINGELS et al., 2008).

Tabela 4. Índice de área foliar (IAF), fração da irradiância fotossintética transmitida (fRf_T) e o coeficiente de extinção da luz (k) ao decorrer dos dias após o plantio (DAP) da cultura de cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: espaçamento simples e espaçamento combinado.

Espaçamento Único				Espaçamento Combinado			
DAP	IAF	fRf_T	k	DAP	IAF	fRf_T	k
85	0,77 ^{ns} ¹	0,53	0,36	88	0,84 ns	0,62	0,56
112	2,82 ns	0,35	0,38	111	2,55 ns	0,30	0,47
140	4,99 ns	0,12	0,42	141	5,12 ns	0,10	0,45
173	5,66 ns	0,06	0,50	169	5,50 ns	0,05	0,55
204	6,06 ns	0,04	0,53	211	6,34 ns	0,05	0,47
Média	-	-	0,44	Média	-	-	0,50

¹(ns) não existe diferença significativa entre os tipos de espaçamento entrelinhas de plantio no nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 21, têm-se as relações entre o negativo do logaritmo natural da fRf_T e o IAF para a cultura da cana-de-açúcar em dois tipos de espaçamento de plantio. Os coeficientes angulares dessas regressões lineares representam os valores médios de k no decorrer do crescimento das plantas para os dois tipos de espaçamentos entre linhas de plantio. As plantas do cultivo com espaçamento entrelinhas único (1 m) tiveram o valor de k igual a 0,48, com erro padrão de estimativa (EPE) de 0,03, sendo esse coeficiente estatisticamente significativo pelo teste t , com $p < 0,01$ e teve um R^2 de 0,985

(Figura 21-A). O valor médio de k para as plantas do cultivo com espaçamento entrelinhas combinado foi igual a 0,51, com EPE de 0,02, esse coeficiente também foi estatisticamente significativo ao nível de 1% pelo teste t ($p < 0,01$) e mostrou R^2 igual a 0,986. Assim, os valores de k do ciclo dos diferentes espaçamentos entrelinhas de plantio foram semelhantes estatisticamente, uma vez que quando considere-se a variação do EPE nos valores dos coeficientes os mesmo se sobrepõem. Logo, de maneira geral, a arquitetura e propriedades ópticas do dossel não foram influenciadas pelo tipo de arranjo de plantio. Esses valores foram superiores ao utilizado por Park et al., (2005), para cultivares de cana-de-açúcar na costa leste da Austrália, que foi igual a 0,4. Muchow et al. (1994), em pesquisa com cana-de-açúcar na Austrália, estabeleceram valor abaixo ($k = 0,38$) dos coeficientes encontrados no presente estudo. Os pesquisadores De Silva e De Costa (2012), em experimento realizado em Sri Lanka, determinaram os valores de k para variedades de cana-de-açúcar em condições de sequeira (sem irrigação) e irrigada, onde os k média foram 0,41 e 0,25, respectivamente. Todavia, as pesquisas citadas acima usaram tubos solarimétricos para medir a irradiância solar transmitida, esses sensores mensuram na faixa espectral entre os comprimentos de ondas de 0,35 a 2,5 micrometros (μm).

A transmitância no interior das plantas é maior quando as medidas são baseadas na radiação solar global ($\lambda = 0,35$ a $2,5 \mu\text{m}$) do que quando feitas com sensores que medem na faixa fotossintética (sensor quantum, $\lambda = 0,4$ a $0,7 \mu\text{m}$), resultante dos diferentes valores de coeficiente de absorção pelas folhas, dos respectivos fluxos radiantes (MONTEITH, 1993; BONHOMME, 2000). Assim, o coeficiente de extinção quando é determinado utilizando dados de irradiância com espectro completo terá valores menores, ou seja, maior transmitância do fluxo radiativo. No presente estudo, as medidas da transmitância foram feitas com sensores que medem na faixa espectral fotossintética. Autores que também usaram sensores com faixa espectral fotossintética encontraram valores de k mais elevados. Por exemplo, Inman-Bamber et al. (1994) determinaram um valor de k igual a 0,55 para a cultura de cana-de-açúcar cultivada na África do Sul. Zhou et al. (2003), com pesquisa realizada no Zimbábue com quatro variedades de cana-de-açúcar, encontraram valores de k entre 0,41 a 0,61.

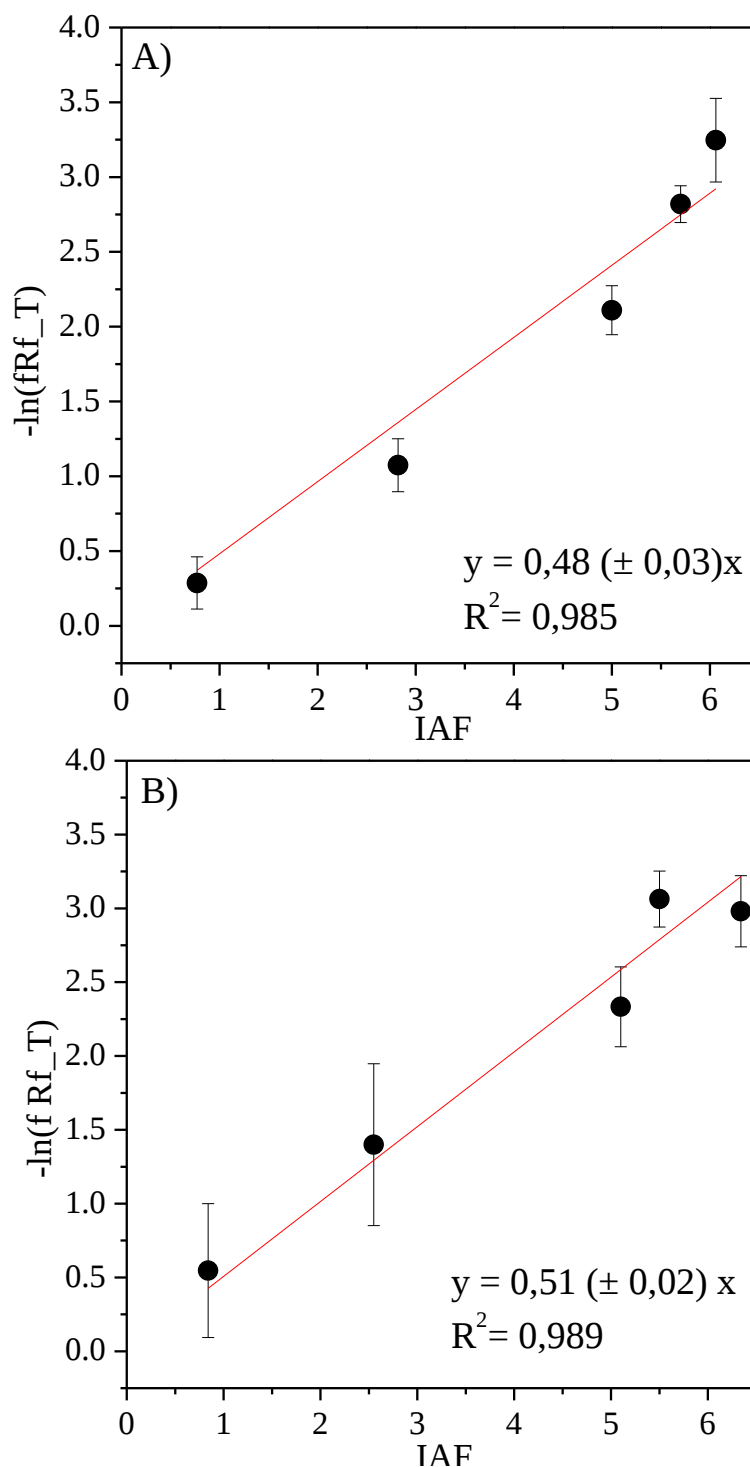


Figura 21. Relação entre o negativo do logaritmo natural da fração da irradiância solar fotossintética transmitida ($-\ln(fRf_T)$) e o índice de área foliar (IAF) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado.

6.4 Cobertura do Solo

As estimativas das taxas de cobertura do solo (CS) diária no decorrer do ciclo, através da partição da radiação pelo dossel, apresentaram tendências similares para os dois tipos de espaçamentos (único e combinado), uma vez que as variáveis de entrada (K e IAF) utilizadas nesse modelo tiveram valores próximos em ambos os cultivos. Assim, na Figura 22 estão apresentados os valores diários médios dos CS dos dois tipos de espaçamentos entrelinhas de plantio. O comprimento da fase de crescimento inicial, que correspondeu do plantio até 56 DAP e 57 DAP para as plantas cultivadas em espaçamento único e espaçamento combinado, respectivamente, foi determinado através da informação dessa estimativa de CS. Pois, concordando com Allen et al. (1998) o final da fase de crescimento inicial (F1) é determinado quando as plantas ocuparem 10% da cobertura do solo. O comprimento da F1 ficou próximo do valor tabelado (50 dias) para a cultura da cana planta (cultura estabelecida com o plantio de colmos é chamada de “cana planta”, após sua colheita, os demais ciclos são chamados de “cana soca”) cultivada nos trópicos (ALLEN et al., 1998). Já o estabelecimento do final da fase de desenvolvimento (F2) ocorre com o efetivo fechamento do dossel. Os mesmos autores citaram que o final dessa fase equivale a um valor de cobertura do solo entre 70 a 80% (no presente estudo foi considerado igual a 80%). Essa porcentagem de cobertura do solo estimada ocorreu 118 DAP nos dois cultivos (Figura 22).

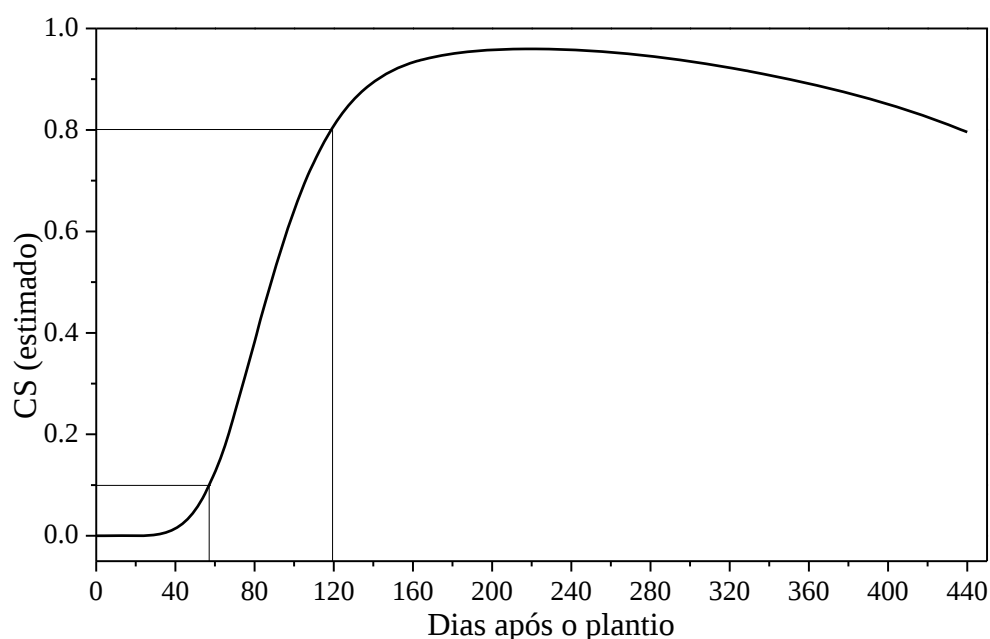


Figura 22. Estimada da cobertura do solo (CS) média dos dois espaçamentos entrelinhas de plantio (único e combinado) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada.

Robertson et al. (1996) consideraram como o completo fechamento da cobertura do solo pelo dossel das plantas quando a radiação transmitida é menor que 5 % da incidente no topo do dossel. Os mesmos autores citam que a cana-soca cultivada na Austrália, sem limitação de água, necessitou de 150 dias após o corte para ter essa cobertura máxima. No presente estudo a cultura precisou de 175 (espaçamento único) e 173 DAP (espaçamento combinado) para atingir o grau de cobertura do solo acima de 95 % ($< 0,5$ % de luz transmitida). Entretanto, Allen et al. (1998) documentaram que o efetivo fechamento do dossel ocorre quando a cobertura do solo encontra-se entre 70 a 80 % ($< 0,30$ ou $0,20$ % de luz transmitida). Os mesmos autores relatam que outra maneira de determinar o fechamento da cobertura vegetal é através da relação entre a mesma com o IAF. Ainda os autores citados acima informam que o valor do IAF igual a três (3) é equivalente ao efetivo fechamento do dossel, que no presente estudo ocorreu no 114 DAP (espaçamento único) e no 115 DAP (espaçamento combinado).

Na Figura 23 são demonstradas as relações entre a cobertura do solo e o índice de área foliar para os cultivos com espaçamento único e combinado. O modelo polinomial do segundo grau tem um ajuste satisfatório, com R^2 de 0,999 e 0,993, respectivamente, para o cultivo com espaçamento único e combinado. Essa relação tem grande aplicação, pois a variável independente (IAF) é comumente determinada em avaliações de crescimento. As equações das relações acima citadas estimaram valores de cobertura do solo coerentes aos mencionados por Allen et al. (1998), que citaram o valor de IAF igual a 3, equivalente a cobertura do solo entre 70 a 80 %. Em pesquisa realizada por Barbieri e Tuon (1992), trabalhando com as culturas de milho, sorgo e cana-de-açúcar, mostraram uma equação resultante de ajuste polinomial do segundo grau entre a cobertura do solo e IAF, com resultados semelhantes às equações encontradas no presente trabalho. Resultado similar foi encontrado por Curt et al. (1998), em trabalho realizado com a cultura do sorgo na Espanha, em que quando as plantas tinham o IAF com valor de 3 a fração da radiação fotossintética interceptada correspondia cerca de 80 %. As culturas de sorgo e de milho apresentam arquitetura foliar semelhante a da cultura da cana-de-açúcar, em que as folhas são dispostas verticalmente em relação ao colmo, tanto que Barbieri e Tuon (1992) em trabalho para estimar a produção potencial de culturas agrícolas agruparam essas três culturas em um único grupo.

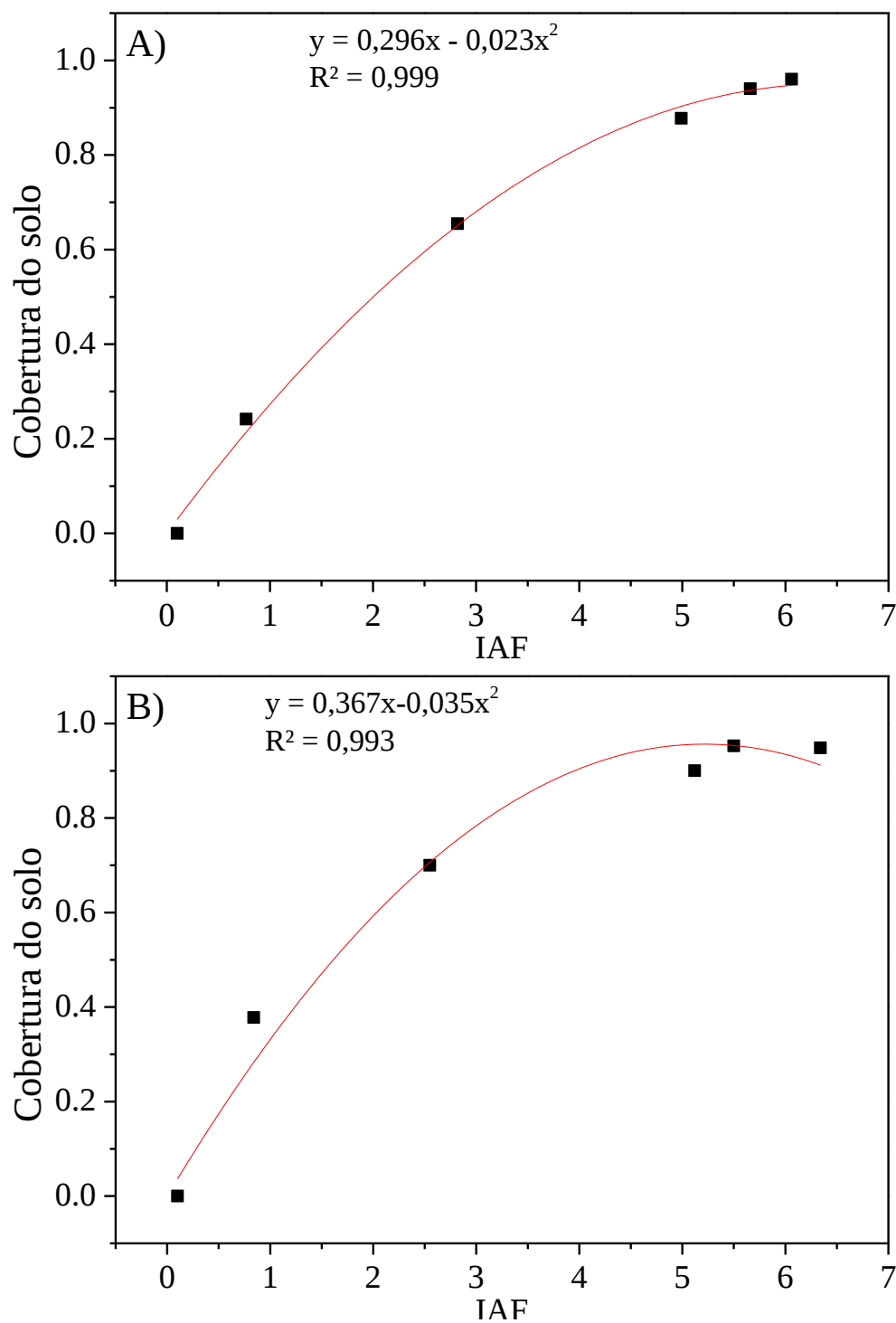


Figura 23. Relação entre a cobertura do solo e o índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado.

6.5 Matéria Seca e Irradiação Interceptada

O particionamento da MS e a irradiação solar fotossintética interceptada acumuladas no decorrer dos DAP para os dois espaçamentos entrelinhas de plantio estão ilustrados na Figura 24. A massa da MS das plantas variou de 2,3 a 7,9 kg m⁻² no espaçamento único e 2,1 a 9,3 kg m⁻² no espaçamento combinado, respectivamente, do 169 ao 439 DAP. No 169 DAP, os colmos tinha menos massa de MS (39,0 %) que as demais partes das plantas (folhas verdes e ponteiros), pois o número de entrenós era menos que 5 por planta. Nesse dia a cultura estava dentro da fase média (F3), onde o fechamento do dossel é efetivo (CS > 80 %), o valor de Kc é máximo e o IAF superior a 5,5. A massa da matéria fresca das plantas inteiras (média de ambos os espaçamentos) nesse dia tinha um teor de água superior a 75 %, sendo superior a 80 % nos colmos. Ao longo das outras amostragens os valores da massa da MS dos colmos aumentaram até atingirem os máximos de 6,8 (espaçamento único) e 8,0 kg m⁻² (espaçamento combinado) na época da colheita. Nesse momento, o conteúdo de água da massa da matéria fresca dos colmos era aproximadamente 50 % do total. Diferentemente do ganho de massa que ocorreu nos colmos, a massa das folhas verdes e das ponteiros foi quase constante ao longo das amostragens, pois a massa perdida pela senescência das folhas mais antigas é compensada pelo aparecimento das novas folhas, ficando com o número de folhas verdes em torno de 5.

O acúmulo da irradiação solar fotossintética interceptada pelo dossel das plantas durante o ciclo dos dois espaçamentos entrelinhas de plantio foram semelhantes, sendo igual a 2770,8 MJ m⁻² no espaçamento único e 2776,5 MJ m⁻² no espaçamento combinado. O período entre os 170 e 244 DAP foi o que as plantas mais acumularam Hf_int média por dia (9,1 MJ m⁻² em ambos os cultivos), resultado da combinação entre o IAF elevado, no início do período era igual a 5,9 (espaçamento único) e 5,7 (espaçamento combinado), e a Hf com média diária igual a 9,5 MJ m⁻² (Hg = 22,2 MJ m⁻²). Conforme se observar na Figura 24, o período de 309 a 364 DAP (14/06 a 09/08/2012) foi o que teve a menor média diária de Hf_int (5,8 e 5,7 MJ m⁻², respectivamente, para espaçamento único e combinado). Esse valor é função da média diária da Hf do período ser relativamente baixa, que foi de 6,5 MJ m⁻² (Hg = 15,0 MJ m⁻²), pois se encontra dentro da estação chuvosa da região.

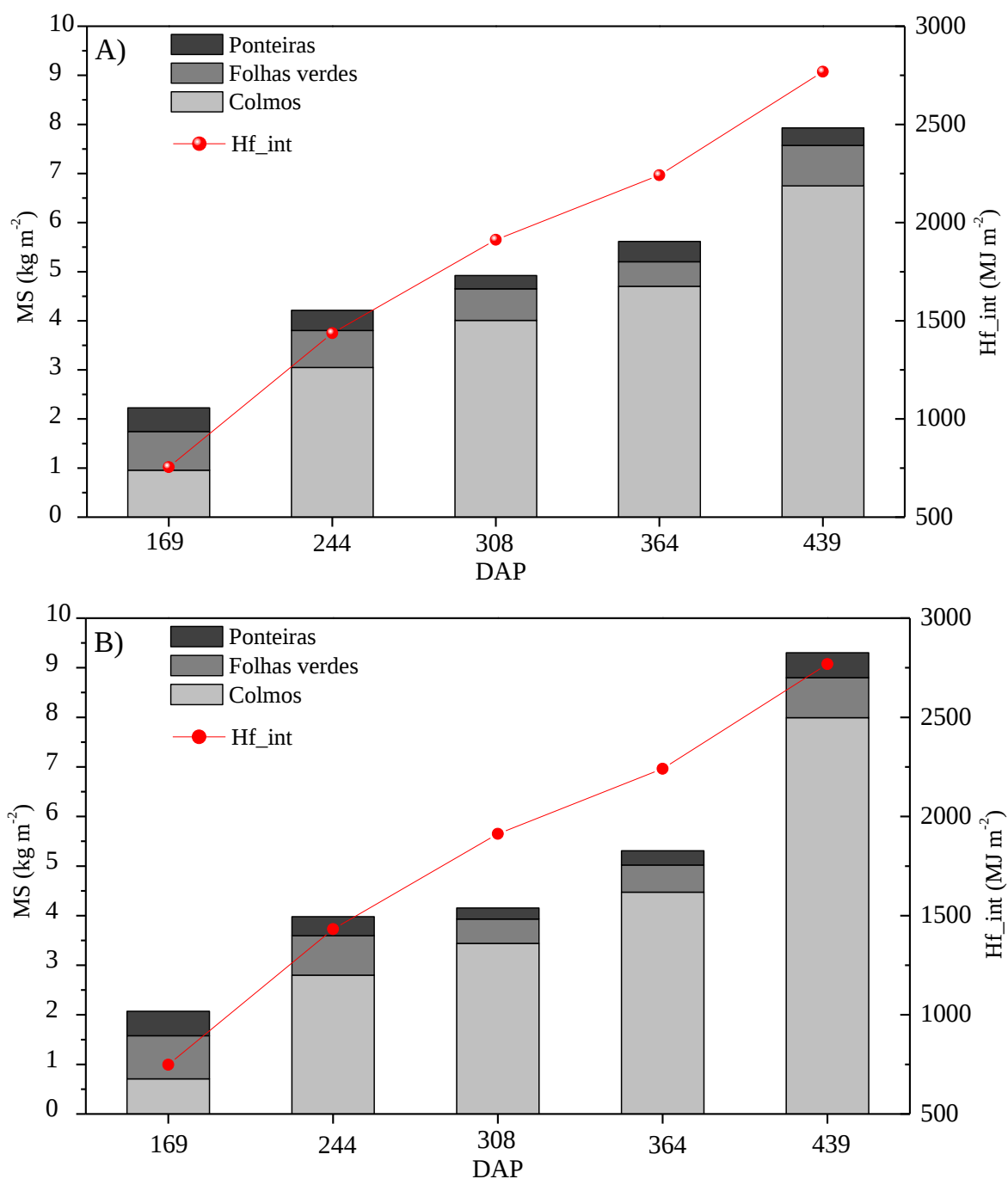


Figura 24. Massa da matéria seca (MS) e irradiação solar fotossintética interceptada (Hf_int) acumuladas em função dos dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado.

Na Figura 25, mostra as relações entre massa da MS dos colmos e a massa da MS total da cana-de-açúcar irrigada nos dois espaçamentos entrelinhas de plantio. Essas relações foram bem ajustadas por uma regressão linear simples, com R^2 igual a 0,993 e 0,984, respectivamente para os espaçamentos simples e combinado. Essa relação tem aplicabilidade na determinação da MS dos colmos em modelos que estimam a MS total da parte aérea em função da radiação solar interceptada, ou seja, pelo parâmetro EUR. A inclinação da reta (β_1) da regressão linear (1,023 e 0,990, respectivamente, para o espaçamento único e combinado) entre o incremento da MS dos colmos pelo incremento da MS total não representa a razão entre esses componentes, já que o coeficiente linear (β_0) é diferentes de zero (1,22 e 1,030, respectivamente para o espaçamento único e combinado). Nessa relação, o valor do intercepto de x representa a MS total necessária para o início da partição para os colmos (SINGELS; SMIT, 2009). Esses valores foram de $1,17 \text{ kg m}^{-2}$ para o espaçamento único e $1,04 \text{ kg m}^{-2}$ para o combinado. Ficando entre os valores encontrados pela pesquisa realizada por Singels e Smit (2009), que variaram de 0,6 a $1,8 \text{ kg m}^{-2}$.

Também está plotado na Figura 25, o teor de água na matéria fresca dos colmos em função dos dias após o plantio. Onde o modelo de Boltzmann teve ajuste com o R^2 de 0,986 e 0,939, respectivamente, para as plantas no espaçamento único e combinado. Todavia, esses ajustes foram sem o último ponto (amostra), pois a condição hídrica das plantas era diferente das demais amostras, uma vez que no final do ciclo a cultura foi propositalmente estressada, para que as plantas aumentassem a concentração de sacarose nos colmos e facilitar as operações mecânicas da colheita. Assim, o teor de água da matéria fresca dos colmos (~50 %) da amostragem feita antes da colheita não seguiu a tendência das demais. Porém, é um importante fator em modelo de produção. Devido ter-se a MS colmos determinada como fração da MS total da parte área (índice de colheita), e com o teor de água da matéria fresca é possível estimar a produtividade de colmos frescos. Por exemplo, utilizando uma EUR igual a 3,6 gramas por irradiação fotossintética interceptada, a produtividade de MS total equivalente a um acúmulo de Hf_{int} de 2620,4 MJ m^{-2} seria de 9433,4 gramas por metro quadrados, e uma produtividade de MS de colmos igual a $8414,2 \text{ g m}^{-2}$. Assim utilizando o teor de água nos colmos de 50 % a produtividade de matéria fresca de colmos (produtividade industrial) seria igual a 16828,4 g m^{-2} , ou seja, aproximadamente 168 toneladas de colmos frescos por hectare.

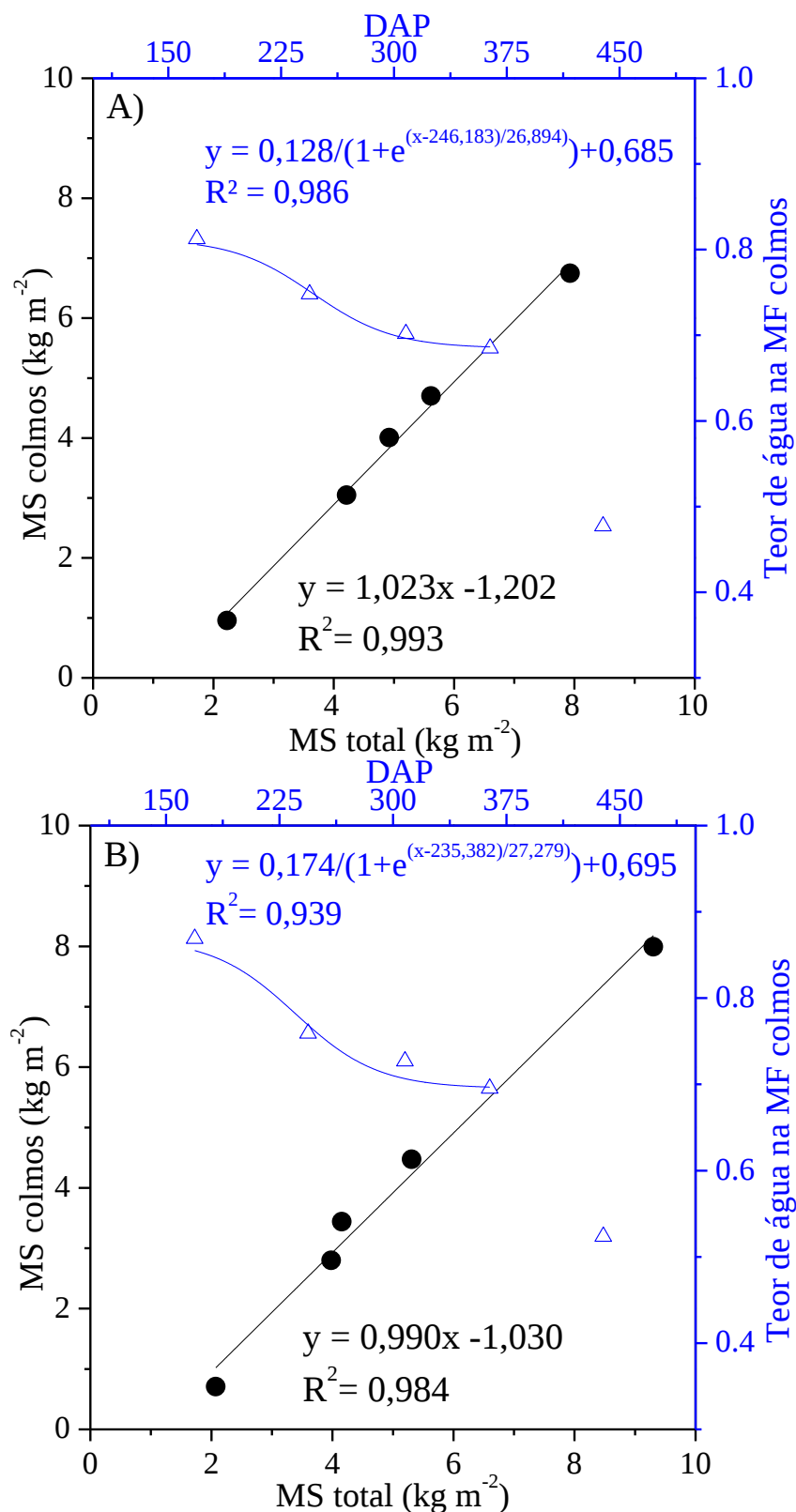


Figura 25. Massa da matéria seca (MS) dos colmos em função da massa da MS total (preto) e teor de água na matéria fresca dos colmos (MF colmos) em função dos dias após o plantio (DAP) (azul) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples; B) espaçamento combinado.

6.6 Eficiência do Uso da Radiação e Energia

As eficiências do uso da radiação média das plantas de cana-de-açúcar foram de 2,73 ($\pm 0,09$) e 2,78 ($\pm 0,25$) g por MJ de Hf_{int} ($R^2 = 0,99$ e 0,96) no espaçamento único e combinado, respectivamente (Figura 26). Esses valores são semelhantes quando considera-se o erro padrão da estimativa. No cultivo com espaçamento simples, a irradiação interceptada acumulada foi de 2762,8 MJ m⁻², com produtividade de MS pelo modelo igual a 7542,4 g m⁻². Já as plantas com espaçamento combinado acumularam 2268,3 MJ m⁻² e tiveram uma massa de MS igual a 7723,6 g m⁻² (estimada pelo modelo). Em revisão feita por Van Heerden et al. (2010), os autores citaram que os valores de EUR de 1,7 (Robertson et al., 1996) e 2,0 g MJ⁻¹ (Muchow et al., 1997), como os maiores encontrados na literatura para a cultura de cana-de-açúcar, utilizando medidas na base de radiação solar global. Nessas pesquisas incluem toda a palhada (folhas secas) na massa da MS da parte aérea das plantas. Utilizando o fator de conversão (0,55) sugerido por Bonhomme, (2000) para converter a EUR na base de radiação solar global para a EUR na base da radiação fotossintética, esses valores citados acima seriam equivalentes a 3,1 e 3,6 g MJ⁻¹ de Hf_{int} , ou seja, são eficiências maiores que a encontrada no presente trabalho. Todavia, nesse trabalho, a massa da MS das folhas secas não foi incluída no total de MS da parte aérea. Apenas nas duas primeiras amostragens foram quantificadas a MS das folhas secas. Considerado esse período, a relação entre a massa de MS (incluído as folhas secas) e a Hf_{int} foram próximas às citadas como máximas, ficando o valor igual a 3,56 g MJ⁻¹ de Hf_{int} (1,96 g MJ⁻¹ de Hg_{int}) no cultivo com espaçamento simples e 3,38 g MJ⁻¹ de Hf_{int} (1,86 g MJ⁻¹ de Hg_{int}) para o cultivo de espaçamento combinado.

O tombamento das plantas provoca esmagamento e quebra dos colmos resultando em mortes dos mesmos (VAN HEERDEN et al., 2010). Assim, esse fator juntamente com a baixa temperatura do ar ocorridas no período chuvoso da região (principalmente entre junho a agosto), muito provavelmente, provocaram diminuição no acúmulo de massa e consequentemente diminuição da EUR. Contudo, as produtividades de colmos (massa fresca) foram elevadas quando comparadas com a média nacional (na safra 2012/13 foi igual a 69,8 Mg ha⁻¹). Os cultivos do presente trabalho atingiram produtividades de colmos de 100,9 Mg ha⁻¹ e de açúcar 17,8 Mg ha⁻¹ para ambos os tipos de espaçamentos entrelinhas de plantio.

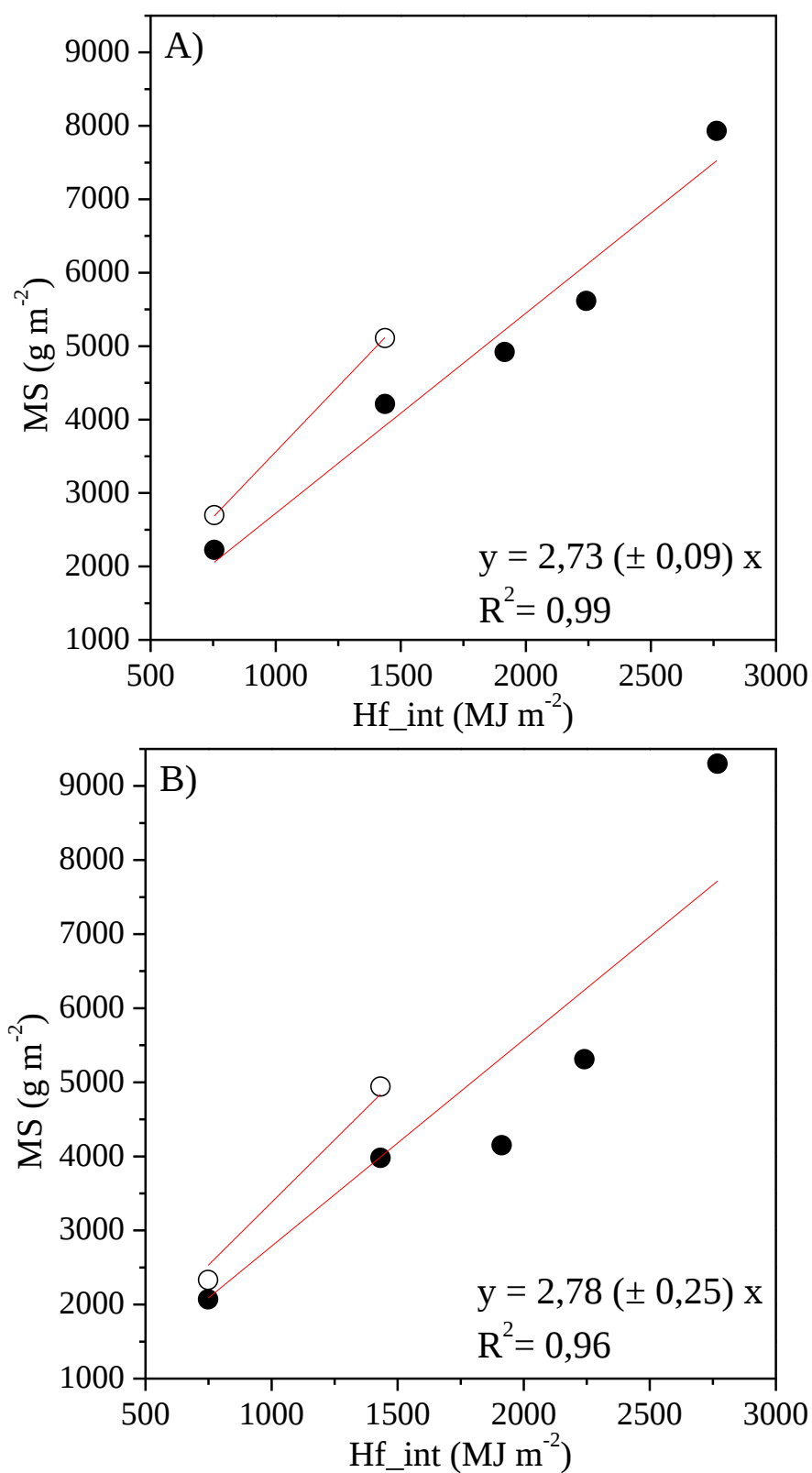


Figura 26. Relação entre a massa da matéria seca (MS) da parte aérea (símbolos vazios inclui as folhas secas) e a irradiação solar fotossintética interceptada (Hf_int) no cultivo da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado.

O calor específico de combustão médio das diferentes partes da planta de cana-de-açúcar (variedade RB98710) foi igual a 16.300 J g^{-1} de MS, já o valor referente à MS dos colmos foi igual a 15.600 J g^{-1} . Ripoli et al. (2000) encontraram valores na ordem de 18.000 J g^{-1} para a cana-de-açúcar. Na cana-de-açúcar a composição da biomassa é constituída principalmente de carboidratos, que tem calor específico de combustão de $\pm 15.900,0 \text{ J g}^{-1}$ (WACLAWOVSKY et al. 2010). Através da determinação do calor específico de combustão foi possível estimar a eficiência em que as plantas armazenaram o fluxo de energia solar interceptada na faixa utilizável pelo processo fotossintético. Na Figura 27 estão ilustradas essas eficiências em diferentes dias após o início do ciclo. As energias de fitomassa acumuladas no final do cultivo foram de 129,26 e $151,65 \text{ MJ m}^{-2}$, respectivamente, para o espaçamento simples e com o combinado. Essas energias armazenadas são resultados de uma eficiência de 4,9 e 5,8 %, respectivamente. Quando essas eficiências foram encontradas pela curva da EUR, os valores foram, respectivamente, 4,4 e 4,5 %. Todavia, essas eficiências são feitas com a irradiação fotossintética interceptada, quando determinada na base da irradiação solar global interceptada seus valores equivale a 2,4 e 2,5 %. Monteith (1977), trabalhando com varias culturas, cita o valor de ECE igual a 2,4 % como equivalente a uma EUR de $1,4 \text{ g MJ}^{-1}$ de Hg interceptada, sendo o calor específico de combustão de 17.500 J g^{-1} . Utilizando o valor de EUR ($2,0 \text{ g MJ}^{-1}$ de irradiação solar global) considerado como máximo na literatura para a cultura da cana-de-açúcar (VAN HEERDEN et al., 2012) e o calor específico de combustão usado no presente trabalho, a eficiência máxima para cana-de-açúcar equivaleria a 3,3 %. Ramanujam e Venkataramana (1999), em pesquisa realizada na Índia, relataram uma ECE (usando a H_f_{int}) de 4,9 % na fase de formação das plantas.

A eficiência de conversão de energia foi menor na fase inicial de cultivo (germinação até a primeira amostragem, 169 DAP), isso ocorre devido ao fato que nesse período a incidência solar é mais elevada na região e o aparato foliar ainda não é o máximo, logo a produção de biomassa da parte aérea é relativamente menor. Outro fator que provavelmente influenciou nessa menor eficiência foi que nesse período a formação do sistema radicular consome energia da parte aérea.

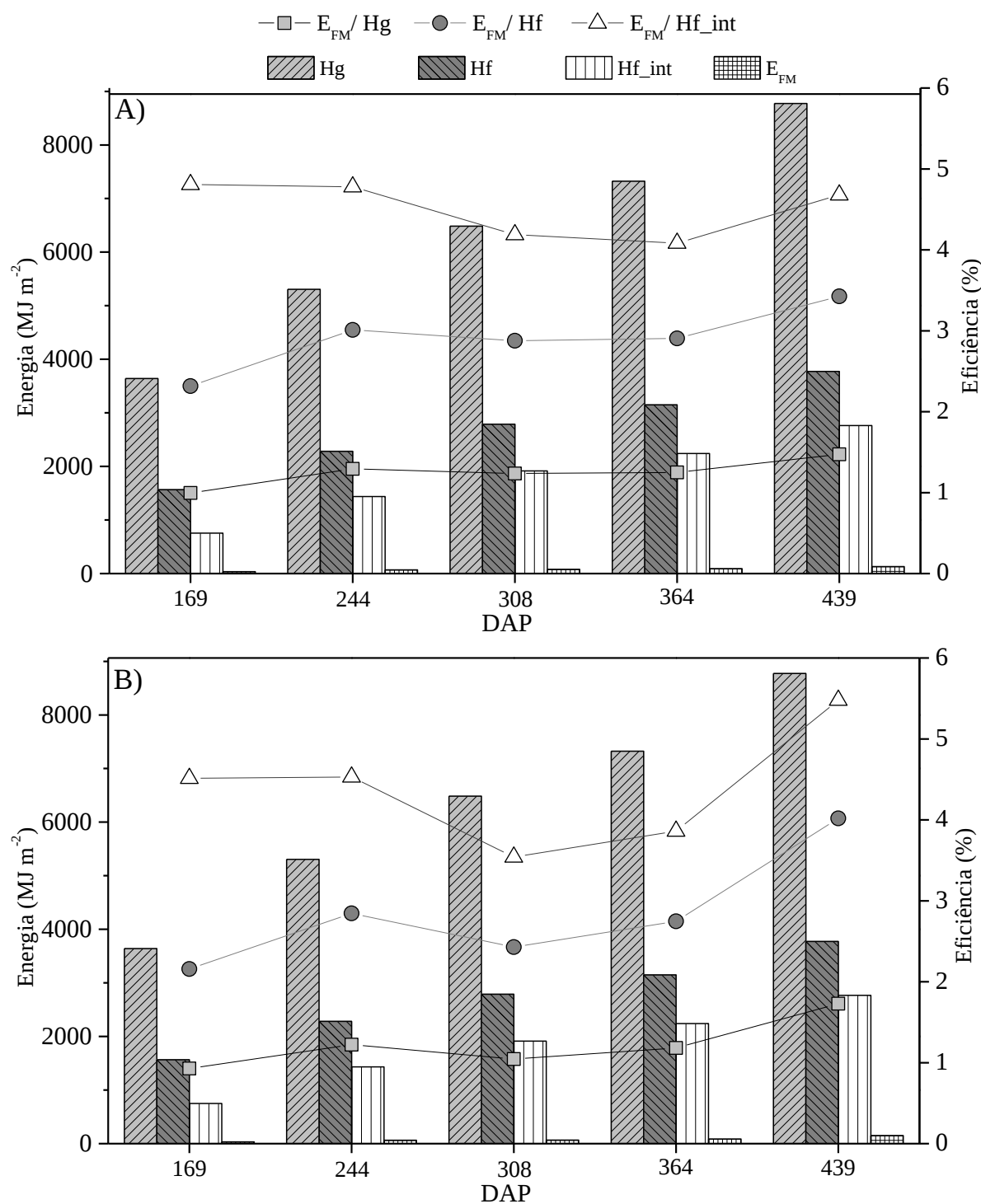


Figura 27. Irradiação solar global (H_g), irradiação solar fotossintética (H_f), irradiação solar fotossintética interceptada (H_{f_int}) e energia de fitomassa (E_{FM}) acumuladas e as eficiências de utilização de energia em função dos dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar irrigada em dois espaçamentos entrelinhas de plantio: A) espaçamento simples. B) espaçamento combinado.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados dessa pesquisa, conclui-se que a produtividade agrícola da cana-de-açúcar irrigada cultivada em Rio Largo – Alagoas não foi influenciada pelo uso dos diferentes espaçamentos entrelinhas de plantio (simples e combinado). Outros parâmetros determinados na pesquisa reforçam que a utilização do espaçamento entrelinhas combinado não sofre perda de produção em relação o espaçamento simples, tais como: o índice de área foliar, o coeficiente de extinção da luz, e por consequência a cobertura do solo (irradiação solar interceptada). As eficiências de conversão da energia solar em fitomassa também foram semelhantes nos dois cultivos (espaçamento simples e espaçamento combinado).

Pode-se também concluir que: 1) a fração de cobertura do solo em ambos os cultivos em relação ao índice de área foliar tiveram equações ajustadas satisfatoriamente; 2) o fator de forma para as folhas da variedade de cana-de-açúcar determinado no estudo é menor que o utilizado geralmente para a cultura, sendo importante a determinação desse fator para outras variedades, visto que a área foliar é uma variável fundamental em modelagem de crescimento e que existe diferença entre as inúmeras variedades comerciais; 3) as variáveis de crescimento (número de plantas por metro quadrado, altura do dossel e comprimento dos colmos) dos dois espaçamentos de plantio foram semelhantes e as relações com os graus-dia acumulados tiveram equações ajustadas com aplicações satisfatórias.

8 REFERÊNCIAS

- ADAMS, J. E.; ARKIN, G.F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.1, p.789-792, 1977.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO; Rome: 1998. 300p.
- ALMEIDA, M.; ROCHELLE, L. A.; CROCOMO, O. J. Chave analítica para determinação de dez variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, n.3, p.16-19, 1995.
- 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**, Lavras, v.32, n. 5, p.1441-1448, 2008.
- AMTHOR, J. S. From sunlight to phytomass: on the potential efficiency of converting solar radiation to phyto-energy. **New Phytologist**, Oxford, v.188, p.939-959, 2010.
- ARTSCHWAGER, E.; BRANDES, E.W. **Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.)**. Washington: USDA, 1958. 307p. (Agriculture Handbook, 122).
- BACCHI, O. O. S.; SOUSA, G. C. Minimum threshold temperature for sugarcane growth. **Proceedings International Society Sugar Cane Technology**, Guatemala, v.16, p.1733-1741, 1977.
- BARBOSA, M. H. P. et al. Genetic improvement of sugar cane for bioenergy: the Brazilian experience in network research with RIDESA. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v.12, p.87-98, 2012.
- BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: DFM / ESALQ / USP, 1992. 17p.

BEN - **Balço Energético Nacional, 2012 (Ano Base 2011)**. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2013.

BEZUIDENHOUT, C.N. **A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugarcane crop model**. 2000. 78 f. M.Tech. thesis - Technikon Natal, Durban.

BONHOMME, R. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. **Field Crop Research**, Amsterdam, v.68, p.247-252, 2000.

BRÉDA, N. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, p.2403-2417. 2003.

BISWAS, B. C. **Agroclimatology of the sugar cane crop**, World Meteorological Organization. Technical note. 193 WMO. N° 703 Geneva Switzerland. 1988. 90p.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**. 2. ed. New York: Springer, 1998. 286p.

CAMPBELL, G. S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.36, p.317-321, 1986.

CARLIN, S. D.; ALMEIDA SILVA, M. A.; ROSSETTO, R. Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.4, p.845-853, 2008.

CONAB, 2012. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, Safra 2012/2013 – terceiro levantamento dezembro/2012**. Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2012

COSTA, M. C. G.; FERREIRA, G. B.; ARAUJO, A. M. de. **Apostila do curso de interpretação de análise de solo e recomendações de calagem e adubação no estado de Roraima**. Boa Vista: EMBRAPA RORAIMA, 2008. (Embrapa Roraima. Documentos, 08).

COSTA, C. T. S. **Crescimento, pigmentos fotossintéticos e produtividade de cana-de-açúcar (saccharum sp.), no quarto ciclo de cultivo**. 2009. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção vegetal)-Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2009.

COSTA, C. T. S. et al. Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de-açúcar no quarto ciclo de cultivo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.24, n.3, p.56-63, 2011.

CURT, M. D.; FERNANDEZ, J.; MARTINEZ, M. Productivity and radiation use efficiency of Sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Cv. Keller in central Spain. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 14, p.169-178, 1998.

DAROS, E. et al. **Liberação Nacional de novas variedades RB de cana-de-açúcar**. Curitiba, 2010, 64p.

DE SILVA, A. L. C.; DE COSTA, W. A. J. M. Growth and radiation use efficiency of sugarcane under irrigated and rain-fed conditions in Sri Lanka. **Sugar Tech**, Heidelberg , v.14, n.3, p.247-254, 2012.

EBERBACH P.; PALA, M. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in Northern Syria. **Plant and Soil**, Dordrecht , v.268, p. 195-208, 2005.

FARIAS, C. H. A. et al. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p.356-362, 2008.

FERREIRA JUNIOR, R. A. **Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada ela radiação solar**. 2010. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção vegetal)-Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2010.

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**, Campina Grande, v.16, n.11, p.1229-1236, 2012.

FRANCIS, C. A.; RUTGER, J. N.; PALMER, A. F. E. A rapid method for leaf plant area estimation in maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**, Madison, v.9, p.537-539, 1969.

GIMENEZ, C.; CONNOR, D. J.; RUEDA, F. Canopy development, photosynthesis and radiation-use efficiency in sunflower in response to nitrogen. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.38, p.15-27, 1994.

GLASZIOU, K. T. et al. Physiology of Sugar-Cane: VII. Effects of temperature, photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Sciences**, East Melbourne, v.18, p.53-66, 1965.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB**, Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

HIROSE, T. Development of the Monsi–Saeki Theory on Canopy Structure and Function. **Annals of Botany**, London, v.95, p.483-494, 2005.

HOZAYN, M.; EL-SHAHAWY, T. A.; SHARARA, F. A. Implication of crop row orientation and row spacing for controlling weeds and increasing yield in wheat. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Punjab, v.6, n.3, p.422-427, 2012.

INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal Plant and Soil**, Pretoria, v.8, n.2, p.93-99, 1991.

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

INMAN-BAMBER, N.G. Climate and water as constraints to production in the South African Sugar Industry. **Proceedings of The Annual Congress of The South African Sugar Technologists Association**, Durban, v.69, p.55-59, 1995.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**. Amsterdam, v.89, p.107–122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N. G. et al. Sucrose accumulation in sugarcane is influenced by temperature and genotype through the carbon source–sink balance. **Crop & Pasture Science**, Collingwood, v. 61, p. 111-121, 2010.

IQBAL M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press; 1983. 390p.

JONCKHEERE, I. et al. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.121, p.19-35, 2004.

KEATING, B. A. et al. Modelling sugarcane production systems I: development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.48, p.27-36, 1999.

KIRINY, J. R. et al.. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.20, p.51-64, 1989.

LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including sub optimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 90, p.119-139, 1998.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.144, p.181-211, 2001.

LONG, S. P. et al. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.29, p.315-330, 2006.

LYRA, G. B. et al. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de tabuleiros costeiros do estado de Alagoas: coeficiente de cultura “único” padrão boletim FAO – 56. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB**, Piracicaba, v.25, n. 4, p.40-43, 2007.

NESMITH, D. S. Estimating summer squash leaf area nondestructively. **HortScience**, Alexandria, v.27, n.1, p.77, 1992.

MADDONNI, G. A.; OTEGUI, M. E. Leaf área, light interception, and crop development in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.48, p. 81-87, 1996.

MCCREE, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against actual leaf photosynthesis data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.10, p. 443-453, 1972.

MICROCAL SOFTWARE, INC. **Data analysis and technical graphics software. Origin Professional Version 6.0**. Northampton, MA: Copyright©, 1999. 772 p.

MIYAMOTO, K. **Renewable biological system for alternative sustainable energy production**. FAO Agriculture Services Bulletin - 128, Rome: 1997. Disponível em: < <http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e00.htm#Contents>>. Acesso em: 10 mai. 2013.

MONSI, M.; SAEKI, T. On the Factor Light in plant communities and its importance for matter production. **Annals of Botany**, London, v.95, p549–567, 2005.

MONTEITH, J. L. **Principles of Environmental Physics**. Edward Arnold, London, 1973, 291p.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v.281, p.277-294, 1977.

MONTEITH J. L. **Using tube solarimeters to measure radiation interception by crop canopies and to analyse stand growth**. Pub. Delta-T Devies, document code TSL – AW-4-1, 1993, 11p.

MONTGOMERY, E. C. **Correlation studies in corn**. In: Nebraska Agric. Exp. Stn. Annu. Rep., 24th, Lincoln, NE, pp.251, 1911.

MUCHOW, R. C. et al. Radiation interception and biomass accumulation in sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v.45, p.37-49, 1994.

MUCHOW, R. C. et al. Yield accumulation in irrigated sugarcane. II. Utilization of intercepted radiation. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, p.646-652, 1997.

MURARO, G. B.; ROSSI JUNIOR, P.; SCHOGOR, A. L. B. Produção de biomassa de cana-de-açúcar em dois espaçamentos e duas frequências de cortes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 131-136, 2011.

OLIVIER, F; SINGELS, A. Water use efficiency of irrigated sugarcane as affected by row spacing and variety. **Proceedings of The Annual Congress of The South African Sugar Technologists Association**, Durban, v.7, p.347-351, 2003.

PARK, S. E.; ROBERTSON, M.; INMAN-BAMBER, N.G. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.305-320, 2005.

PEREIRA, A. R. Estimativa da área foliar em milharal. **Bragantia**, Campinas, v.46, n.1, p. 147-150, 1987.

PINTER, Jr. et al. Remote sensing for crop management. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Maryland, v.69, n.6, p.647–664, 2003.

Ramanujam, T.; Venkataramana, S. Radiation interception and utilization at different growth stages of sugarcane and their influence on yield. **Indian Journal of Plant Physiology**, New Delhi, v.4, p. 85-89, 1999.

RÍPOLI, T. C. C.; MOLINA JR, W. F.; RÍPOLI, M. L. C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.4, p.677-681, 2000.

RITCHIE, J. T. A Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. **Water Resources Research**, Washington v.8, p.1204-1213, 1972.

ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W.; MUCHOW, R. C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia: I. radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.48, p.11-25, 1996.

ROBERTSON, M. J. et al. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v.25, p.819-828, 1998.

RODRIGUES, E. B.; ABI SAAB, O. J. G. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Bandeirantes - PR. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.28, n.4, p. 581-588, 2007.

SAGE, R. F.; ZHU, X-G. Exploiting the engine of C4 photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.62, p. 2989-3000, 2011.

SANTOS. M. A. et al. Coeficiente da cultura no estágio inicial de desenvolvimento para cana-de-açúcar em diferentes datas de plantio na região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB**, Piracicaba, v.27, n.6, p.30-33, 2009.

SILVA, T. G. F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco.** 2009. 194 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Meteorologia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SILVA, T. G. F. et al. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, n.3, p.500-509, 2012.

SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Radiation use efficiency. **Advances Agronomy**, New York, v.65, p.215-265, 1999.

SINCLAIR, T. R. et al. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, n. 02/03, p.171-178, 2004.

SINGELS, A. et al. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.249-260, 2005.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO: sugarcane plant module: scientific documentation.** Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling: South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

SINGELS, A.; SMIT, M. A. Sugarcane response to row spacing-induced competition for light. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 113, p.149-155, 2009.

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

SOLTANI, A.; SINCLAIR, T. R. **Modeling physiology of crop development, growth and yield.** Wallingford, CABI, 2012. 322p.

SOUZA, J.L. et al. Análise da Precipitação e Temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, período 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 12, n.1, p.131-141, 2004.

SOUZA, J. L. et al. Irradiância solar global e radiação fotossinteticamente ativa em Maceió, ano 2003. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 14., 2005, Campinas, SP, 2005.

SOUZA, A. P. et al. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.31, n.8, p.1116-1127, 2008.

SOUZA, J. E. A. **Avaliação das diversas fontes e tipos de biomassa do estado de Alagoas: estudo de suas características físico-químicas e de seu potencial energético.** 2011. 180f. Tese (Doutorado em Ciências)-Instituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

SOUZA, J. L. et al. Irradiância solar global e fotossintética em regiões de Alagoas. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 17., Guarapari-ES, 2011.

SOUZA, R. C. et al. Growth of the crabgrass species *Digitaria ciliaris* and *Digitaria nuda*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.30, n.2, p.317-325, 2012.

STEDUTO, P. et al. **Crop yield response to water**. Irrigation and Drainage Paper No. 66, FAO; Rome, 2012, 503p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).

TEH, C.B.S. **Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer program**. BrownWalker Press, Boca Raton, Florida, 2006, 256p.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham, Chronica Botanica, 1952. 371p.

VARLET-GRANCHER, C. et al. Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v.9, p.419-439, 1989.

VAN HEERDEN, P. D. R. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.61, n.11, p. 2877–2887, 2010.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, p.665-671, 2008.

WACLAWOVSKY, A. J. et al. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, Oxford, v.8, p.263-276, 2010.

ZHOU, M.; SINGELS, A.; SAVAGE, M. J. Physiological parameters for modelling differences in canopy development between sugarcane cultivars. **Proceedings of The Annual Congress of The South African Sugar Technologists Association**, Durban, v.77, p. 610-621, 2003.

ZHU, X. G.; LONG, S. P.; ORT, D. R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? **Current Opinion in Biotechnology**, Amsterdam. v.19, p.153-159, 2008.

ZHU X. G.; LONG S. P.; ORT, D. R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v.61, p.235–261, 2011.